



**Analyse und technisch-ökonomische Bewertung von
Gesetzesfolgen im Individualverkehr
- dargestellt am Beispiel der Automobilindustrie
Japans und Deutschlands**

**Von der Carl-Friedrich-Gauß-Fakultät
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig**

zur Erlangung des Grades

**Doktor der Wirtschaftswissenschaften (Dr. rer. pol.)
genehmigte Dissertation**

von Grischa Meyer

geboren am 22.09.1972 in Meersburg am Bodensee

Eingereicht am: 29.04.2009

Mündliche Prüfung am: 01.07.2009

Referent: Prof. Dr. rer. pol. Thomas Stefan Spengler

Korreferent: Prof. Dr. rer. pol. Wolfgang Fritz

2009

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Mitarbeiter der Volkswagen AG, Abteilung Außenbeziehungen, sowie als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Die Arbeit hat die technisch-ökonomische Bewertung von Gesetzesfolgen im Individualverkehr zum Inhalt.

Allen Personen, die direkt oder indirekt einen Beitrag zum Entstehen dieser Arbeit geleistet haben, möchte ich an dieser Stelle danken.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater und Leiter des Instituts für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion Herrn Prof. Dr. rer. pol. Thomas Stefan Spengler für die vielen fachlichen Anregungen und Hinweise, die konstruktiven Diskussionen in Deutschland und Japan sowie die persönliche Unterstützung, die er mir immer wieder hat zukommen lassen. Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Prof. Dr. rer. pol. Wolfgang Fritz, Leiter des Instituts für Marketing, für die Übernahme des Zweitgutachtens sowie Herrn Prof. Dr. rer. pol. Gernot Sieg, Leiter des Instituts für Volkswirtschaftslehre, für das der Arbeit entgegengebrachte Interesse. Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. phil. Ulrich Menzel, Leiter des Lehrstuhls für Internationale Beziehungen und Vergleichende Regierungslehre, für die hilfreichen Hinweise, insbesondere zum japanischen Markt sowie für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission und die Schaffung einer positiven Prüfungsatmosphäre.

Ein herzliches Dankeschön gilt meinen Kolleginnen und Kollegen, die mich sowohl auf fachlicher als auch auf persönlicher Ebene begleitet haben. Ganz besonders möchte ich mich bei PD Dr. rer. pol. Grit Walther bedanken, die durch vielfältige konzeptionelle Anregungen und konstruktive Gespräche sowie durch mehrfache Durchsicht, Ergänzungen und Korrekturen wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Zu besonderem Dank bin ich weiterhin Dr. rer. pol. Marcus Schröter, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Jörg Wansart sowie Dipl.-Wirtsch.-Ing. Karsten Kiekhäfer verpflichtet. Für die gute Zusammenarbeit möchte ich mich an dieser Stelle auch bei Dr. rer. pol. Wiebke Junge, Dr. rer. pol. Stefan Rehkopf, Dr. rer. pol. Thomas Volling, Dr. rer. pol. Eberhard Schmid, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Anne Schatka, Dipl.-Kfm. Niklas Labitzke, Dipl.-Math. Oec. Kerstin Schmidt und Dr. rer. pol. Dolores Alicia Queiruga Dios bedanken. Für die Unterstützung bei der EDV-technischen Umsetzung der entwickelten Konzepte danke ich den Diplomanden Dipl.-Wirtsch.-Ing. Thorsten Koch, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Dennis Otten und Dipl.-Wirtsch.-Ing. Tim Richters.

Auf der Seite der Volkswagen AG möchte ich mich besonders bei Herrn Dr. Ing. Hans-Jürgen Schäfer, Leiter Technik und Wissenschaft der Abteilung Außenbeziehungen, bedanken. Die mit ihm geführten Gespräche haben mich auch mit ingenieurwissenschaftlichen Methoden vertraut gemacht. Mein weiterer Dank gilt Herrn Hauke Bruhn, Leiter Volkswagen Technical

Representative Tokyo (VTT) sowie Frau Eriko Tokui-Bandel, Frau Yoshiko Tamura, Herrn Takanori Nozaki, Herrn Setsuo Takasaki und Herrn Tomoaki Shimomoto.

Es ist darüber hinaus besonders erfreulich, daß sich aus der vorliegenden Arbeit eine intensive Kooperation zwischen der Volkswagen AG und der Technischen Universität Braunschweig entwickelt hat.

Meine Familie hat mich während der Zeit sehr unterstützt und durch das Korrigieren und Formatieren unmittelbar zum erfolgreichen Abschluß der Arbeit beigetragen. Mein herzlichster Dank gilt meiner Frau Nora, die mich darüber hinaus stets mit Geduld und Verständnis begleitet und mir den erforderlichen Rückhalt gegeben hat.

Berlin, den 28.10.2009

Grischa Meyer

GLIEDERUNGSÜBERSICHT

1	EINLEITUNG	1
1.1	Ausgangslage und Problem	1
1.2	Ziel und Lösungsweg.....	3
2	RAHMENBEDINGUNGEN DES INDIVIDUALVERKEHRS	6
2.1	Auswirkungen des Straßenverkehrs auf Mensch und Umwelt	6
2.2	Natürliche Rahmenbedingungen.....	8
2.3	Technisch-ökonomische Rahmenbedingungen	18
2.4	Politisch-rechtliche Rahmenbedingungen	47
2.5	Gesellschaftliche Rahmenbedingungen	60
2.6	Zusammenfassung	66
3	POLITISCHE INSTRUMENTE IM VERKEHR	68
3.1	Grundprinzipien umweltpolitischer Eingriffe	68
3.2	Internalisierung negativer externer Effekte.....	69
3.3	Umwelt- und verkehrspolitische Anreizinstrumente.....	73
3.4	Notwendigkeit eines Systems zur Entscheidungsunterstützung	102
4	ANALYSEINSTRUMENTE UND ÖKONOMISCHE KAUFVERHALTENSMODELLE	105
4.1	Anforderungen an ein Analyseinstrument	105
4.2	Einordnung von Analyseverfahren	109
4.3	Auswahl eines geeigneten Analyseinstrumentes	118
4.4	Ansätze zur Analyse der Kaufentscheidung.....	123
4.5	Zusammenfassung	132
5	ERSTELLUNG EINES SIMULATIONSMODELLS.....	134
5.1	Elemente der Modellierung mit System Dynamics.....	134
5.2	Ziel des Instrumentes zur Entscheidungsunterstützung	137
5.3	Modellformulierung	144
5.4	Modellstruktur für den deutschen Automobilmarkt	154
5.5	Modellstruktur für den japanischen Automobilmarkt	205
6	FALLSTUDIE	223
6.1	Übersicht der Szenarien und Ziele im Modell Deutschland	223
6.2	Szenarien mit Variation der Rahmenbedingungen	225
6.3	Szenarien mit Einsatz ökonomischer Instrumente	237
6.4	Übersicht der Szenarien im Modell Japan	250
6.5	Analyse der Wirkung weiterer umweltpolitischer Instrumente.....	258
6.6	Zusammenfassende Gegenüberstellung und Auswertung der erzielten Ergebnisse	266

7	SCHLUßFOLGERUNGEN UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN	271
7.1	Schlußfolgerungen und kritische Würdigung des gewählten Modellierungsansatzes.....	271
7.2	Ableitung von Handlungsempfehlungen	273
7.3	Ausblick.....	282
8	ZUSAMMENFASSUNG.....	285

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
1.1	Ausgangslage und Problem	1
1.2	Ziel und Lösungsweg.....	3
2	RAHMENBEDINGUNGEN DES INDIVIDUALVERKEHRS	6
2.1	Auswirkungen des Straßenverkehrs auf Mensch und Umwelt	6
2.2	Natürliche Rahmenbedingungen.....	8
2.2.1	Lokal und kurzlebig wirkende Luftverunreinigungen	9
2.2.2	Überregional und langlebig wirkende Luftverunreinigungen	10
2.2.3	Ressourcenbeanspruchung	12
2.2.4	Verkehrs- und Belastungssituation im Vergleich	13
2.2.4.1	Verkehrs- und Belastungssituation in Deutschland.....	13
2.2.4.2	Verkehrs- und Belastungssituation in Japan	15
2.2.5	Zusammenfassung	18
2.3	Technisch-ökonomische Rahmenbedingungen	18
2.3.1	Technische Potentiale zur Reduktion von Luftschadstoffen	18
2.3.1.1	Funktionsweise von Otto- und Dieselmotoren	19
2.3.1.2	Innermotorische Optimierung	20
2.3.1.3	Abgasnachbehandlungssysteme	21
2.3.2	Technische Potentiale zur Kraftstoffverbrauchs- und CO ₂ -Minderung	23
2.3.2.1	Verbesserung der Motorentechnologie	23
2.3.2.2	Hubraumverkleinerung und Verbesserung der Getriebe	24
2.3.3	Alternative Kraftstoffe zur Minderung von Luftschadstoffen und CO ₂	24
2.3.3.1	Überblick.....	25
2.3.3.2	Synthetische Kraftstoffe aus Erdgas (Gas-to-Liquid)	25
2.3.3.3	Synthetische Kraftstoffe aus Biomasse (Biomass-to-Liquid)	26
2.3.3.4	Biodiesel	27
2.3.3.5	Methanol- und Ethanolbetrieb.....	28
2.3.4	Marktpotential von Otto- und Dieselantrieben	29
2.3.5	Elektrische Antriebe	32
2.3.5.1	Funktionsweise von Elektroantrieben	33
2.3.5.2	Marktpotential von Elektroantrieben	33
2.3.6	Hybridantriebe.....	34
2.3.6.1	Funktionsweise des Hybridantriebs	34
2.3.6.2	Marktpotential des Hybridantriebs.....	37
2.3.7	Brennstoffzellenbetrieb	39
2.3.7.1	Funktionsweise der Brennstoffzelle	40

2.3.7.2	Marktpotential von Brennstoffzellen	42
2.3.8	Autogas und Erdgas	43
2.3.8.1	Funktionsweise von Autogas- und Erdgasfahrzeugen	43
2.3.8.2	Marktpotential von Autogas- und Erdgasfahrzeugen.....	45
2.3.9	Zusammenfassung	46
2.4	Politisch-rechtliche Rahmenbedingungen	47
2.4.1	Übersicht	47
2.4.2	CARB-Gesetzgebung	49
2.4.3	EPA-Gesetzgebung	52
2.4.4	EU-Gesetzgebung.....	52
2.4.5	Japan-Gesetzgebung.....	57
2.4.6	Zusammenfassung	60
2.5	Gesellschaftliche Rahmenbedingungen	60
2.5.1	Identifikation gesellschaftlicher Akteure.....	61
2.5.2	Lebenszyklusmodell gesellschaftlicher Forderungen.....	62
2.6	Zusammenfassung	66
3	POLITISCHE INSTRUMENTE IM VERKEHR	68
3.1	Grundprinzipien umweltpolitischer Eingriffe	68
3.2	Internalisierung negativer externer Effekte.....	69
3.2.1	Umwelnutzung als Problem ökonomischer Knappheit	69
3.2.2	Pareto-Optimum als umweltpolitisches Leitbild	70
3.3	Umwelt- und verkehrspolitische Anreizinstrumente.....	73
3.3.1	Überblick.....	73
3.3.2	Umweltauflagen	74
3.3.2.1	Umweltauflagen in der ökonomischen Theorie	74
3.3.2.2	Umweltauflagen im Verkehrssektor	76
3.3.3	Umwelthaftung.....	78
3.3.4	Umweltabgaben und -subventionen	80
3.3.4.1	Umweltabgaben und -subventionen in der ökonomischen Theorie	80
3.3.4.2	Ökosteuer als Verbrauchssteuer im Verkehrssektor.....	81
3.3.4.3	Kfz-Steuer als Besitzsteuer im Verkehrssektor.....	83
3.3.4.4	Bonus- und Maluszahlungen im Verkehrssektor	85
3.3.4.5	Verschrottungsprämien im Verkehrssektor.....	89
3.3.5	Umweltzertifikate.....	90
3.3.5.1	Umweltzertifikate in der ökonomischen Theorie.....	90
3.3.5.2	Umweltzertifikate im Verkehrssektor	91
3.3.6	Informatorische, organisatorische und freiwillige Instrumente	94
3.3.6.1	Umweltbetriebsprüfungen.....	94

3.3.6.2	Freiwillige Selbstverpflichtungen	94
3.3.6.3	Verbraucherinformation	95
3.3.6.4	Ökologisches Marketing	99
3.3.6.5	Suasorische Instrumente.....	100
3.3.7	Vergleich der Instrumente	100
3.4	Notwendigkeit eines Systems zur Entscheidungsunterstützung	102
4	ANALYSEINSTRUMENTE UND ÖKONOMISCHE KAUFVERHALTENSMODELLE	105
4.1	Anforderungen an ein Analyseinstrument	105
4.2	Einordnung von Analyseverfahren	109
4.3	Auswahl eines geeigneten Analyseinstruments	118
4.4	Ansätze zur Analyse der Kaufentscheidung.....	123
4.4.1	Mikroökonomische Ansätze des Konsumentenverhaltens	124
4.4.2	Die Theorie diskreter Auswahlentscheidungen	127
4.5	Zusammenfassung	132
5	ERSTELLUNG EINES SIMULATIONSMODELLS.....	134
5.1	Elemente der Modellierung mit System Dynamics.....	134
5.2	Ziel des Instrumentes zur Entscheidungsunterstützung	137
5.2.1	Methodisches Vorgehen	138
5.2.2	Problemdefinition.....	139
5.2.3	Entwicklung einer dynamischen Hypothese.....	141
5.3	Modellformulierung	144
5.3.1	Managementsimulatoren	144
5.3.2	Steuer- und Rabattmodell.....	145
5.3.3	Erweiterung des Steuer- und Rabattmodells	150
5.4	Modellstruktur für den deutschen Automobilmarkt	154
5.4.1	Trennung von Antriebsarten und Kraftstoffsorten	154
5.4.1.1	Kraftstoffsorten	154
5.4.1.2	Antriebsarten.....	155
5.4.2	Erweiterung und Anpassung der Emissionen	158
5.4.3	Erweiterung des Modells um eine Fahrzeugalterungskette	158
5.4.4	Bestimmung der jährlichen Neuzulassungen	163
5.4.5	Käuferpräferenzen in Deutschland	166
5.4.6	Anpassung der Fahrzeugeigenschaften	167
5.4.6.1	Dynamische Kaufpreisentwicklung	168
5.4.6.2	Kraftstoffkosten und Verbrauchsberechnung.....	170
5.4.6.3	Reichweitenberechnung	173
5.4.6.4	Berechnung der Emissionsanteile	175

5.4.6.5	Berechnung der Kraftstoffverfügbarkeit und Kraftstoffzusammensetzung	177
5.4.6.6	Berechnung der durchschnittlichen Motorleistung	178
5.4.7	Weitere exogene Rahmenbedingungen im Modell.....	179
5.4.7.1	Kraftstoffpreisentwicklung	180
5.4.7.2	Jährliche Fahrleistung	182
5.4.8	Handlungsalternativen und Entscheidungsvariablen im Modell	182
5.4.8.1	Kraftstoffbesteuerung durch Verbrauchsteuern (Ökosteuer)	183
5.4.8.2	Bonus- und Maluszahlungen auf den Kaufpreis	184
5.4.8.3	Kfz-Steuer auf Basis der CO ₂ -Emissionen.....	184
5.4.8.4	Verschrottungsprämien	186
5.4.8.5	Produktionsschluß für Dieselfahrzeuge ohne Partikelfilter.....	188
5.4.8.6	Nachrüstung von Partikelfiltern bei Dieselfahrzeugen.....	189
5.4.9	Haushaltspolitikmodelle für die Bonus- und Maluszahlungen.....	190
5.4.10	Bedienungsoberflächen	193
5.4.11	Autopilot für den ‚Management Flight Simulator‘	196
5.4.11.1	Steuerung der Entscheidungsvariablen	196
5.4.11.2	Homogene Bonus- und Malusstrategie (Requal-Modell).....	196
5.4.11.3	Lenkungswirkungsbezogene Bonus- und Malusstrategie (Ropt-Modell)	198
5.4.11.4	Strategie und Präferenzmodell der Ökosteuersatzanpassung	200
5.4.11.5	Berücksichtigung des Einflusses von TIME STEP	201
5.4.12	Eingriffspunkte in die Autopilotfunktion (neue Bedienungsoberfläche).....	203
5.5	Modellstruktur für den japanischen Automobilmarkt	205
5.5.1	Automobilsteuern in Japan	205
5.5.2	Anpassung der Fahrzeugeigenschaften	206
5.5.2.1	Referenzmodus Toyota	207
5.5.2.2	Dynamische Kaufpreisentwicklung	211
5.5.2.3	Kraftstoffkosten und Verbrauchsberechnung.....	212
5.5.2.4	Angleichung weiterer Attribute.....	214
5.5.3	Erweiterung und Anpassung der Emissionen	214
5.5.4	Erweiterung des Modells um eine Fahrzeugalterungskette	216
5.5.5	Bestimmung der jährlichen Neuzulassungen	218
5.5.6	Käuferpräferenzen in Japan.....	219
5.5.7	Handlungsalternativen und Entscheidungsvariablen im Modell	220
5.5.7.1	Bonuszahlungen auf den Kaufpreis – ‚Green Tax Systems‘	220
5.5.7.2	Kraftstoffbesteuerung durch Verbrauchssteuern (Ökosteuer).....	221
5.5.7.3	Kombination der umweltpolitischen Instrumente	222
5.5.8	Zusammenfassung	222

6	FALLSTUDIE	223
6.1	Übersicht der Szenarien und Ziele im Modell Deutschland	223
6.2	Szenarien mit Variation der Rahmenbedingungen	225
6.2.1	Szenario 1: Ausgangsszenario ohne äußere Einflüsse	225
6.2.2	Szenario 2: Technischer Fortschritt	226
6.2.3	Szenario 3: Verbindliche Nutzung von alternativen Kraftstoffen	229
6.2.4	Szenario 4: Verringerung des Kraftstoffverbrauchs	232
6.2.5	Szenario 5: Variation der durchschnittlichen Fahrleistung pro Jahr	234
6.2.6	Szenario 6: Steigerung der Preise für fossile Kraftstoffe	236
6.3	Szenarien mit Einsatz ökonomischer Instrumente	237
6.3.1	Szenario 7: Wirkung der Kfz-Steuerungsumstellung auf CO ₂ -Emissionsbasis	237
6.3.2	Szenario 8: Wirkung des Malus für Dieselfahrzeuge ohne Partikelfilter	239
6.3.3	Szenario 9: Homogenes Modell konstanter Förderungssumme	241
6.3.4	Szenario 10: Wirkung der Verschrottungsprämien	245
6.3.5	Szenario 11: Optimale Lenkungswirkung	246
6.4	Übersicht der Szenarien im Modell Japan	250
6.4.1	Szenario 1 mit konstanten Parametern (Anfangsszenario)	251
6.4.2	Szenario 2 mit nichtlinearer Angleichung der Fahrzeugattribute	255
6.5	Analyse der Wirkung weiterer umweltpolitischer Instrumente	258
6.5.1	Verschärfung des ‚Green Tax Systems‘ in 2004	258
6.5.2	Wirkung von Verbrauchsteuern	260
6.5.3	Kombination der umweltpolitischen Instrumente	263
6.6	Zusammenfassende Gegenüberstellung und Auswertung der erzielten Ergebnisse	266
7	SCHLUßFOLGERUNGEN UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN	271
7.1	Schlußfolgerungen und kritische Würdigung des gewählten Modellierungsansatzes	271
7.2	Ableitung von Handlungsempfehlungen	273
7.2.1	Politische Entscheidungsträger	274
7.2.2	Automobilindustrie	277
7.2.3	Kunden	279
7.2.4	Wissenschaft	280
7.3	Ausblick	281
8	ZUSAMMENFASSUNG	283
	LITERATUR	286

*) Für die vorliegende Arbeit liegt ein unveröffentlichter ANHANG mit Modellgleichungen vor.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2 1:	Die Bedeutung der Nutzungsphase in Bezug auf den Gesamtlebenszyklus eines Fahrzeugs [Eigene Darstellung nach Goldmann 2005; Volkswagen 2007b].....	7
Abbildung 2 2:	Abweichung des globalen Mittels der Lufttemperatur an der Erdoberfläche vom langfristigen Mittel 1961 – 1990 [UBA 2003a]	11
Abbildung 2 3:	Veränderung der umweltrelevanten Entwicklungsschwerpunkte [Eigene Darstellung nach Hadler 2005]	13
Abbildung 2 4:	Prozentualer Anteil der Fahrzeugsegmente am Stickoxid- und Feinstaubausstoß und prozentualer Anteil des Transports am Ausstoß von Kohlendioxid [Ministry Of Environment 2000].	16
Abbildung 2 5:	Neuzulassungen von Benzin- und Dieselfahrzeugen in Westeuropa [Polk Marketing Systems 2005].	30
Abbildung 2 6:	Image von Dieselfahrzeugen in Japan [AT 2005]	31
Abbildung 2 7:	Marktanteil von Dieselfahrzeugen nach Regionen (inkl. LKW und Bussen) [Bosch 2004].....	32
Abbildung 2 8:	Hybride Antriebskonfigurationen [Oba et. al 2004]	35
Abbildung 2 9:	Energiespeichersysteme für Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeuge – Kriterien [Ullrich 2005]	41
Abbildung 2 10:	Markteinführungsszenarien und Kostenziele für Brennstoffzellentechnologie [VDI 2003, S. 385]	42
Abbildung 2 11:	Geltungsbereiche der verschiedenen Abgasgesetzgebungen [Bosch 2006]	49
Abbildung 2 12:	ACEA-Selbstverpflichtung von 140 gCO ₂ /km [UBA 2003c, UBA 2003e]	56
Abbildung 3 1:	Bestimmung des gesellschaftlich ‚optimalen‘ Emissionsniveaus [Michaelis 1996, S. 10f.]	71
Abbildung 3 2:	Einordnung von Umweltauflagen [Hemmelskamp 1999, S. 28]	75
Abbildung 3 3:	Systematik der Umweltabgaben [Hemmelskamp 1999, S. 31]	80
Abbildung 3 4:	Bestehende Energieeffizienzkennzeichen für PKW	97
Abbildung 3 5:	Formblatt zur Berechnung der Energieeffizienz eines Autos [UBA 2003h]	98
Abbildung 3 6:	Plakettenmuster der Deutschen Umwelthilfe [DUH 2005b]	98
Abbildung 3 7:	Design der japanischen Umweltzeichen in 2004	98
Abbildung 4 1:	Einordnung der Analyseinstrumente [Eigene Darstellung nach Hüttner 1986, S. 1ff.; Bossel 1992, S. 29ff.; Makridakis et al. 1998, S. 10ff.].....	111
Abbildung 4 2:	Regelkreis zur Planung und Steuerung industrieller Produktionsprozesse [Spengler 1998; Zäpfel 2000]	117
Abbildung 4 3:	System Dynamics Modellierungsphasen [Eigene Darstellung nach Forrester 1994, S. 245ff.]	122
Abbildung 4 4:	Indifferenzkurve bei Konvexität und Monotonie der Präferenzen [Eigene Darstellung nach Varian 2001, S. 36ff., 43].....	125

Abbildung 4 5:	Auswirkungen von Maßnahmen der Produktpolitik und des Marketing im Eigenschaftsraum [Eigene Darstellung nach Herrmann 1992, S. 94].....	126
Abbildung 4 6:	Die Dichtefunktion der Gumbel-Verteilung ($\eta=0$, $\square=1$) [Maier und Weiss 1990, S. 73].....	130
Abbildung 5 1:	Bestands- und Flußgrößen mit gleichem Informationsgehalt und graphische Integration [Stermann 2000, S. 194, S. 235].....	135
Abbildung 5 2:	Die Regelung des Wasserhahns kontrolliert den Wasserfluß [Senge 1996, S. 96ff.]	136
Abbildung 5 3:	Beispiele für positive und negative Rückkopplungsschleifen [Eigene Darstellung nach Kirkwood 1998, S: 8ff.].....	136
Abbildung 5 4:	Charakteristische Verhaltensmuster dynamischer Systeme [Kirkwood 1998, S. 30; Sterman 2000, S: 108ff.].....	137
Abbildung 5 5:	Nichtlineare Systeme erster Ordnung: S-förmiges Wachstum [Stermann 2000, S. 285; Deaton und Winebreak 1999, S. 3ff.]	137
Abbildung 5 6:	Entwicklung eines System Dynamics Modells als iterativer Prozeß [Stermann 2000, S. 87; Randers 1980, S. 119ff.].....	138
Abbildung 5 7:	Kausaldiagramm zur Erklärung des problematischen Verhaltens von Gesetzesfolgen	142
Abbildung 5 8:	Grundstruktur eines Verkehrs- und Emissionsmodells [Eigene Darstellung nach Schmidt 2003]	143
Abbildung 5 9:	Budget aus Bonus- und Maluszahlen sowie Verbrauchssteuern [Ford 1999, S. 266].	146
Abbildung 5 10:	Berechnung der Marktanteile [Ford 1999, S. 265]	148
Abbildung 5 11:	Westliches und asiatisches Kaufverhalten [Eigene Darstellung nach Schütte 1999, S. 39f.; Mahajan et al. 2000, S. 6]	152
Abbildung 5 12:	Übersicht über die Modellstruktur Deutschland und Japan	153
Abbildung 5 13:	Mögliche Kraftstoffversorgung der einzelnen Fahrzeugtypen	154
Abbildung 5 14:	Indexvariable 'emission types'	158
Abbildung 5 15:	Detailansicht der Altersklasse für Fahrzeuge von 1 bis 5 Jahren	159
Abbildung 5 16:	Altersverteilung des Fahrzeugbestandes in Deutschland 2004 [KBA 2004b, S. 137].]	159
Abbildung 5 17:	I Fahrzeugbestand vor und nach Korrektur der Löschraten-Anfangswerte.....	161
Abbildung 5 18:	Struktur des Fahrzeugabsatzes.....	164
Abbildung 5 19:	Lookup-Variable zur Bestimmung der jährlichen Neuzulassungen in Deutschland	164
Abbildung 5 20:	Erste Ableitung s-förmigen logistischen Funktion	165
Abbildung 5 21:	Käuferpräferenzen für den Neuwagenkauf in Deutschland [Eigene Darstellung nach Bauer 2004, S. 173; Stern 2003, S. 23f.]	167
Abbildung 5 22:	Fahrzeugattribut Kaufpreis	168
Abbildung 5 23:	Lookup-Funktion zur nichtlinearen Fahrzeugpreisanpassung	170
Abbildung 5 24:	Berechnung der Verbrauchsentwicklung.....	171
Abbildung 5 25:	Berechnung der spezifischen Kraftstoffkosten	172
Abbildung 5 26:	Berechnung der dynamischen Reichweitenentwicklung	174

Abbildung 5 27: Berechnung der Emissionsanteile.....	176
Abbildung 5 28: Berechnung der Kraftstoffverfügbarkeit.....	177
Abbildung 5 29: Berechnung der Kraftstoffzusammensetzung.....	178
Abbildung 5 30: Dynamische Berechnung der durchschnittlichen Motorleistung.....	179
Abbildung 5 31: Entwicklung der Wareneinstandspreise für Kraftstoffe.....	181
Abbildung 5 32: Entwicklung der Fahrleistungen.....	182
Abbildung 5 33: Struktur des Kraftstoffsteuersatzes und der Ökosteuereinnahmen	183
Abbildung 5 34: CO2-emissionsbasierte Kfz-Steuersätze nach der Umstellung [Albrecht 2005]	185
Abbildung 5 35: Berechnung der Kaufentscheidungsbeeinflussung durch die CO2-basierte Kfz-Steuer.....	186
Abbildung 5 36: Berechnung der fiskalischen Wirkungen der CO2-basierten Kfz-Steuer in der Alterungskette	186
Abbildung 5 37: Berechnung der Basisrate der Verschrottungsprämien.....	188
Abbildung 5 38: Berechnungsstruktur der Partikelfilter-Nachrüstungsrate.....	189
Abbildung 5 39: Verlauf der Variablen ‚willingness to change‘	190
Abbildung 5 40: Berücksichtigung der Umrüstungen im Fahrzeugbestand	190
Abbildung 5 41: Haushaltspolitikmodell in der Basisvariante	191
Abbildung 5 42: Haushaltspolitikmodell in der Advanced-Variante.....	192
Abbildung 5 43: Das ‚Scenario Control Center‘ zur Festlegung exogener Rahmenbedingungen.....	193
Abbildung 5 44: Das ‚Cockpit of Politician‘ zum Einsatz der umweltpolitischen Instrumente	194
Abbildung 5 45: Die Struktur des Autopiloten zur Regelung der Bonus- und Maluszahlungen	197
Abbildung 5 46: Bestimmung der Bonushöhe im Ropt-Modell.....	199
Abbildung 5 47: Bestimmung der Malushöhe im Ropt-Modell	199
Abbildung 5 48: Struktureller Aufbau des Ökosteuerautopiloten und ein typischer Verlauf der Steuersät- ze	200
Abbildung 5 49: Zusammenhang zwischen TIME STEP und Korrekturfaktor.....	202
Abbildung 5 50: Gesamtfahrzeugbestand in Abhängigkeit von der Variablen ‚TIME STEP‘ vor und nach erfolgter Korrektur	202
Abbildung 5 51: Das ‚Cockpit of politician‘ in der Autopilot-Version	203
Abbildung 5 52: Modul zu Berechnung der Kraftstoffkosten	213
Abbildung 5 53: Lookup-Funktion zur nichtlinearen Kraftstoffkostenanpassung.....	214
Abbildung 5 54: Lookup-Variable zur Bestimmung der jährlichen Neuzulassungen	218
Abbildung 5 55: Statisches Szenario GTS mit Ökosteuern: Kraftstoffkosten pro Kilometer.....	221
Abbildung 6 1: Haushalt- und Fahrzeugbestandsentwicklung ohne äußere Einflüsse	225
Abbildung 6 2: Entwicklung der Neuverkäufe ohne äußere Einflüsse	226
Abbildung 6 3: Emissionsentwicklung ohne äußere Einflüsse	226

Abbildung 6 4:	Fahrzeugbestandsentwicklung bei technischen Fortschritt.....	227
Abbildung 6 5:	Entwicklung der Neuverkäufe bei technischem Fortschritt	228
Abbildung 6 6:	Emissionsentwicklung bei technischem Fortschritt.....	228
Abbildung 6 7:	Fahrzeugbestände mit Beeinflussung durch die Kraftstoffstrategie	229
Abbildung 6 8:	Einfluß der Kraftstoffstrategie auf die Emissionsentwicklung	231
Abbildung 6 9:	Einfluß der technischen Verbrauchsreduzierung auf Emissionsentwicklungen	232
Abbildung 6 10:	Fahrzeugbestände ohne Ausnutzung der technischen Verbrauchsreduzierung	233
Abbildung 6 11:	Einfluß der technischen Verbrauchsreduzierung auf den Bestand der Brennstoffzellen- fahrzeuge	234
Abbildung 6 12:	Veränderung der durchschnittlichen Fahrleistung pro Fahrzeug	234
Abbildung 6 13:	Fahrzeugbestände bei sich jährlich verringernder Fahrleistung	235
Abbildung 6 14:	Vergleich der Emissionen von Szenario 5 und Szenario 2	235
Abbildung 6 15:	Wareneinstandspreisentwicklung für Kraftstoffe in Szenario 2 und Szenario 6	236
Abbildung 6 16:	Fahrzeugverkäufe bei stärkerer Kraftstoffpreiserhöhung.....	236
Abbildung 6 17:	Vergleich der Emissionen bei stärkerer Kraftstoffpreiserhöhung	237
Abbildung 6 18:	Fahrzeugbestandsentwicklung nach Umstellung der Kfz-Steuer	238
Abbildung 6 19:	Entwicklung der Neuverkäufe bei Kfz-Steuerumstellung	238
Abbildung 6 20:	Emissionsentwicklung mit Detailansicht bei Kfz-Steuerumstellung.....	239
Abbildung 6 21:	Fiskalische Auswirkungen der Umstellung mit und ohne Steuersatzanpassung	239
Abbildung 6 22:	Dieselfahrzeugbestände ohne und mit PMx-Filter bei Einführung eines Malus	240
Abbildung 6 23:	Entwicklung Partikelemissionen bei Variation der Höhe des Filter-Malus.....	240
Abbildung 6 24:	Verlauf der Bonus- und Maluszahlungen durch Autopilotsteuerung ‚Requal‘	241
Abbildung 6 25:	Gesamte Förderungszahlungen, Haushaltslage und Ökosteuererinnahmen.....	242
Abbildung 6 26:	Anpassung der Ökosteuersätze durch Autopiloten ‚Requal‘	242
Abbildung 6 27:	Fahrzeugbestände bei homogenen Bonus- und Maluszahlungen	243
Abbildung 6 28:	Neuverkäufe bei homogenen Bonus- und Maluszahlungen	243
Abbildung 6 29:	Emissionen bei homogenen Bonus- und Maluszahlungen	244
Abbildung 6 30:	Haushaltsentwicklung bei einer Fördersumme von 8 Milliarden EUR	244
Abbildung 6 31:	Gesamtfahrzeugbestand mit und ohne Zahlung einer Verschrottungsprämie	245
Abbildung 6 32:	Emissionsentwicklung mit und ohne Zahlung einer Verschrottungsprämie.....	245
Abbildung 6 33:	Haushaltsentwicklung mit und ohne Zahlung einer Verschrottungsprämie	246
Abbildung 6 34:	Höhe der Bonus- und Maluszahlungen bei optimaler Lenkungswirkung.....	246
Abbildung 6 35:	Haushaltsentwicklung bei optimaler Lenkungswirkung.....	247
Abbildung 6 36:	Entwicklung der Neuverkäufe bei optimaler Lenkungswirkung	248

Abbildung 6 37: Verlauf der Fahrzeugbestände bei optimaler Lenkungswirkung	248
Abbildung 6 38: Emissionsentwicklung bei optimaler Lenkungswirkung	249
Abbildung 6 39: Vergleich der gesamten Fördermittel und der gesamten Einnahmen aus den Maluszahlungen zur Finanzierung für die Szenarien 9 und 11	249
Abbildung 6 40: Statisches Referenzszenario: Absatzzahlen nach Fahrzeugtypen	252
Abbildung 6 41: Statisches Referenzszenario: Absatzzahlen nach Fahrzeuggröße	252
Abbildung 6 42: Statisches Referenzszenario: Marktanteile des Fahrzeugbestandes	253
Abbildung 6 43: Statisches Referenzszenario: Emissionen des Fahrzeugbestandes	254
Abbildung 6 44: Statisches Referenzszenario: Ausgaben für Steuerermäßigungen	255
Abbildung 6 45: Dynamisches Referenzszenario: Absatzzahlen nach Fahrzeugtypen	256
Abbildung 6 46: Dynamisches Referenzszenario: Marktanteile des Fahrzeugbestandes	256
Abbildung 6 47: Dynamisches Referenzszenario: Emissionen des Fahrzeugbestandes	257
Abbildung 6 48: Dynamisches Referenzszenario: Ausgaben für Steuerermäßigungen	257
Abbildung 6 49: Statisches Szenario Verschärfung GTS: Absatzzahlen nach Fahrzeugtypen	259
Abbildung 6 50: Statisches Szenario Verschärfung GTS: Marktanteile des Fahrzeugbestandes	259
Abbildung 6 51: Statisches Szenario Verschärfung GTS: Rabatte nach Fahrzeugtypen	260
Abbildung 6 52: Statisches Szenario Verschärfung GTS: Ausgaben für Steuerermäßigungen	260
Abbildung 6 53: Statisches Szenario GTS mit Ökosteuer: Absatzzahlen nach Fahrzeuggröße	261
Abbildung 6 54: Statisches Szenario GTS mit Ökosteuer: Absatzzahlen nach Fahrzeugtyp	261
Abbildung 6 55: Statisches Szenario GTS mit Ökosteuer: Marktanteile am Fahrzeugbestand	262
Abbildung 6 56: Statisches Szenario GTS mit Ökosteuer: Emissionen des Fahrzeugbestandes	262
Abbildung 6 57: Statisches Szenario GTS mit Ökosteuer: Ausgaben für die Steuerermäßigungen	263
Abbildung 6 58: Dynamisches Szenario GTS, Verschärfung und Ökosteuer: Absatzzahlen	264
Abbildung 6 59: Dynamisches Szenario GTS, Verschärfung und Ökosteuer: Marktanteile	264
Abbildung 6 60: Dynamisches Szenario GTS, Verschärfung und Ökosteuer: Emissionen	265
Abbildung 6 61: Dynamisches Szenario GTS, Verschärfung und Ökosteuer: Ausgaben für Rabatte	265

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2 1:	Anteil des Straßenverkehrs an den Luftschadstoffemissionen in Deutschland ¹⁾²⁾³⁾ [UBA 2006].....	15
Tabelle 2 2:	Absatzzahlen der ‚Clean Energy Vehicles‘ und ‚Low Emission Vehicles‘ [JAMA 2004c, S. 1ff.; Marklines 2005a, Marklines 2005b]	17
Tabelle 2 3:	Mittlere spezifische Schadstoffemissionen (g/km) der im Jahre 2002 zugelassenen PKW-Flotte differenziert nach Otto- und Diesel-PKW [UBA, schriftliche Mitteilung vom 17.09.2004 zitiert nach SRU 2005]	20
Tabelle 2 4:	Schadstoffgrenzwerte von PKW in der Europäischen Union [UBA 2003c; 2003e]	54
Tabelle 2 5:	Emissionsgrenzwerte von PKW in Japan [JAMA 2005a, S. 48; JAMA 2004a, S. 60]	57
Tabelle 2 6:	CO ₂ -Minderungsziele in Japan [ACEA 2005a]	58
Tabelle 2 7:	Voraussetzung für PKW in km/l nach Top-Runner-Ansatz [ECCJ 2005, S. 28]	59
Tabelle 2 8:	Informationsgrundlagen zur Erfassung von Interessengruppen [Meffert und Kirchgeorg 1998, S. 96]	61
Tabelle 2 9:	Treibende Faktoren für alternative Fahrzeuge [E4Tech].....	62
Tabelle 2 10:	Diskussionen und Ereignisse von 2000 bis 2004 im Themenfeld Umwelt und Verkehr 2004 in Deutschland [imug 2005, BMU 2004]	64
Tabelle 2 11:	Befragung von Führungskräften nach aktuellen umweltpolitischen Themen [VTT 2003b].....	65
Tabelle 3 1:	Umweltpolitische Instrumente [Hemmelskamp 1999, S. 27; Michaelis 1996, S. 26]	74
Tabelle 3 2:	Mineralöl- und Stromsteuersätze im Rahmen der Ökologischen Steuerreform (ÖSR) [UBA 2003g; BMF 2006b]	82
Tabelle 3 3:	Übersicht der PKW-Steuern in Japan (Betrieb) [JAMA 2003a, S. 21]	83
Tabelle 3 4:	Übersicht der PKW-Steuern in Japan (Anschaffung und Besitz) [JAMA 2003a, S. 21].....	85
Tabelle 3 5:	Steuervergünstigungen im ‚green tax system‘ [JAMA 2004a, S. 60]	87
Tabelle 3 6:	Steuervergünstigungen im ‚green tax system‘ 2006 bis 2008 [JAMA 2004a, S. 60].....	88
Tabelle 3 7:	Umweltpolitische Eingriffsmöglichkeiten im Vergleich [Fritsch et al. 1996, S. 119f.]	101
Tabelle 4 1:	Klassifizierung von Modellen [Eigene Darstellung nach Liebert 2001, S. 38]	108
Tabelle 5 1:	Umrechnungsfaktoren auf SI-Einheiten [Bosch 2002, S. 21ff.; Börse 2005].....	153
Tabelle 5 2:	Umrechnungsfaktor auf SI-Einheiten (US-Dollar in Japanische Yen) [Bosch 2002, S. 21ff.]	154
Tabelle 5 3:	PKW-Bestand nach Altersklassen und Antriebsvarianten in 2004 [KBA 2004b, S. 17, 136ff., BGW 2005, Dudenhöffer 2005b].....	160
Tabelle 5 4:	Ermittelte Anfangswerte für kombinierte Löschungsraten der Alterskohorten [KBA 2003, S. 140, 339]	161
Tabelle 5 5:	Anpassungsfaktoren für altersbedingte Emissionssteigerungen verschiedener Luftschadstoffe [UBA 2003c, UBA 2003e, Shell 2004, S. 37].....	163
Tabelle 5 6:	Anfangswerte der realen Marktanteile für Neuverkäufe gemäß der Neuzulassungen 2003 gegliedert nach Antriebsarten [KBA 2003, S. 113; Dudenhöffer 2005b, S. 8]	165

Tabelle 5 7:	Koeffizienten der Nutzenfunktion	166
Tabelle 5 8:	Käuferpräferenz der Fahrzeugeigenschaften [Eigene Berechnungen nach Bunch 1992, S. 25; Ford 1999, S. 265f.; Bauer 2004, S. 173; Stern 2003, S. 23f.].....	167
Tabelle 5 9:	Durchschnittliche Kaufpreise in EUR der Fahrzeugtypen im Jahr 2004 [DAT 2004, S. 11ff., 45; BGW 2005].....	169
Tabelle 5 10:	Entwicklung des Durchschnittsverbrauchs der Fahrzeugtypen pro 100 km [SRU 2005, S.160ff; DAT 2004, S. 11ff., 45; 50].....	171
Tabelle 5 11:	Entwicklung der durchschnittlichen Reichweiten nach Fahrzeugtypen [Volkswagen 2004a, Volkswagen 2004b].....	175
Tabelle 5 12:	Durchschnittliche Emissionsanteile von Neufahrzeugen im Jahr 2004 [DAT 2004, S.2; UBA 2003c; Volkswagen 2004b].....	175
Tabelle 5 13:	Durchschnittliche Emissionsanteile alternativer Kraftstoffe im Jahr 2004.....	176
Tabelle 5 14:	Entwicklung der Kraftstoffverfügbarkeit	177
Tabelle 5 15:	Entwicklung der Kraftstoffanteile für Otto-, Diesel- und Gaskraftstoffe	178
Tabelle 5 16:	Entwicklung der durchschnittlichen Motorleistung [DAT 2004, S. 11ff., 45]	179
Tabelle 5 17:	Wareneinstandspreise für Kraftstoffe im Jahr 2005 [ARAL 2006a, 2006b; 2005a, 2005b].....	180
Tabelle 5 18:	Durchschnittspreise, Wiederverkaufs- und Restwerte von PKW in 2004 nach Zulassungsjahren [Eigene Berechnungen nach Schwacke 2003, S. 4ff.; ADAC 2004c, S. 3ff.].....	187
Tabelle 5 19:	Kraftstoffsteuern in Japan [Eigene Berechnungen nach JAMA 2004a, S: 59].....	205
Tabelle 5 20:	Japanische Automobilsteuer in Abhängigkeit von der Motorengröße [JAMA 2002, S. 10].....	206
Tabelle 5 21:	Klassifizierung der ‚Low Emission Vehicles‘ nach Motorengröße [Eigene Berechnungen nach JAMA 2002, S. 10]	206
Tabelle 5 22:	PKW-Neuzulassungen im Jahr 2001 nach Fahrzeugtyp [Eigene Berechnungen]	207
Tabelle 5 23:	Attributdaten von ‚herkömmlichen‘ Benzinfahrzeugen [Eigene Berechnungen].....	208
Tabelle 5 24:	Attributdaten der ‚umweltfreundlichen‘ Benzinfahrzeuge (Referenzbestand Toyota) [Eigene Berechnungen]	209
Tabelle 5 25:	Attributdaten von Hybridfahrzeugen [Eigene Berechnungen]	209
Tabelle 5 26:	Attributdaten von Elektrofahrzeugen [Eigene Berechnungen nach Bosch 2002, S. 640; Ford 1999, S. 261].....	210
Tabelle 5 27:	Attributdaten von Erdgasfahrzeugen (CNG) [Eigene Berechnungen]	210
Tabelle 5 28:	Attributdaten von Dieselfahrzeugen [Eigene Berechnungen]	211
Tabelle 5 29:	Übersicht der Kraftstoffkosten (gerundete Werte) [Eigene Berechnungen].....	211
Tabelle 5 30:	Kraftstoffpreisentwicklung in Japan seit 1993 in Yen [PAJ 2005, S. 22]	212
Tabelle 5 31:	Kraftstoffverbrauchsentwicklung in Japan seit 1992 in l/ 100km [PAJ 2005, S. 22].....	213
Tabelle 5 32:	Emissionsgrenzwerte von PKW in Japan [JAMA 2005a, S. 48; JAMA 2004a]	215
Tabelle 5 33:	Bestimmung der Emissionswerte in Prozent in Abhängigkeit vom Referenzwert [Eigene Berechnungen].....	215

Tabelle 5 34:	Altersanpassungsfaktoren für die Fahrleistung [Eigene Berechnungen nach BenDor 2004, S. 16f.]	216
Tabelle 5 35:	Emissionsstandards der betrachteten Zeiträume [JAMA 2004a, S. 44].....	216
Tabelle 5 36:	Altersanpassungsfaktoren für die betrachteten Emissionen [Eigene Berechnungen]	217
Tabelle 5 37:	Werte für die natürliche Löschrungsrate [AIRA 2004]	217
Tabelle 5 38:	Anfangsbestand der Alterskohorten [Eigene Berechnungen nach AIRA 2004].....	218
Tabelle 5 39:	Umrechnung der Koeffizienten der Nutzenfunktionen [Eigene Berechnungen nach Ford 1999, S. 266, FUB 2005; Börse 2005; Bosch 2002, S. 21ff.]	219
Tabelle 5 40:	Rangfolgeberechnung der Attribute	220
Tabelle 6 1:	Übersichtstabelle der untersuchten Szenarien im deutschen Modell.....	224
Tabelle 6 2:	Übersichtstabelle der untersuchten Szenarien im japanischen Modell.....	250
Tabelle 6 3:	Szenarien mit Variation der Rahmenbedingungen (Szenario 1-6)	267
Tabelle 6 4:	Szenarien mit Einsatz ökonomischer Instrumente (Szenario 7-11)	268
Tabelle 6 5:	Übersicht der Szenarien im Modell Japan (Szenario 1-5)	270

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abs.	Absatz (in Gesetzen, Textabschnitt)
ACEA	Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA)
AEF	Age Emission Factor
AL	Alcoholic Vehicle
ANRE	Agency of Natural Resources and Energy
APAR	Asia-Pacific Automotive Report
Art.	Artikel (in Gesetzen)
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung zum BImSchG
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BTL	Biomass-to-Liquid, alternativer Kraftstoff aus vergaster Biomasse, ‚Sunfuel‘
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CAFE	Corporate Average Fuel Economy
CARB	California Air Resource Board
CH ₂	Compressed Hydrogen, komprimierter gasförmiger Wasserstoff
CH ₃ OH	Methanol (Ethanol: CH ₃ -CH ₂ -OH)
CH ₄	Methane (Methan)
CO	Carbon Monoxide (Kohlenmonoxid)
CO ₂	Carbon Dioxide (Kohlendioxid)
CNG	Compressed Natural Gas Vehicle
CV	Conventional Vehicle
dB (A)	Dezibel (logarithmische Maßeinheit für Schalldruck nach Bewertungskurve A)
d.h.	das heißt
DPF	Dieselpartikelfilter
DSS	Decision Support Systems
DUH	Deutsche Umwelthilfe
E.	Einwohner
ECE	Economic Commission for Europe
ECCJ	Energy Conservation Center Japan
engl.	Englisch
EV	Electric Vehicle
EG	Europäische Gemeinschaft
EPA	Environmental Protection Agency
ET	Eco Tax (Ökosteuer)
et al.	et alii
etc.	et cetera
EU	Europäische Union
EV	Electric Vehicle

evtl.	eventuell
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
Feebate	Steuerrabattsystem (Kunstwort aus Fee und Rebate)
F&E	Forschung und Entwicklung
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
Feebate	Steuerrabattsystem (Kunstwort aus fee und rebate)
FKW	Fluorkohlenwasserstoffe
ggf.	gegebenenfalls
Gl.	Gleichung
GT	Gigatonnen
GTL	Gas-to-Liquid, alternativer Kraftstoff aus Erdgas, „Synfuel“
GVW	Gross Vehicle Weight
GWP	Global Warming Potential
H ₂	Wasserstoff
HC	Hydrocarbon (Kohlenwasserstoffe, hier gleichbedeutend mit VOC)
HEV	Hybrid Electric Vehicle
Hrsg.	Herausgeber
i.d.R.	in der Regel
IEA	International Energy Agency (Internationale Energiebehörde)
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg e.V.
IHK	Industrie- und Handelskammer
I/O	Input-/ Output
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IT	Informationstechnologie
JAIA	Japan Automobile Importers Association
JAMA	Japan Automobile Manufacturers Organization
JARI	Japan Automobile Research Institute
JETRO	Japan External Trade Organization
JSAE	Society of Automotive Engineers (Japan)
k.A.	keine Angabe
KBA	Kraftfahrtbundesamt
LEV	Low Emission Vehicle
LNG	Liquefied Natural Gas
LPG	Liquefied Petroleum Gas
METI	Ministry of Economy, Trade and Industry (ehem.: Ministry of International Trade and Industry)
Mio.	Million
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MNL	Multinomial Logit (Modell)
MOE	Ministry of the Environment
MOT	Mineral Oil Tax
mpg	miles per gallon
mph	miles per hour

MS	Marktanteil (market share)
MT	Megatonnen
MWV	Mineralölwirtschaftsverband e.V.
N ₂ O	Distickstoffoxid (Lachgas)
NEDC	New European Driving Cycle (NEFZ=Neuer Europäischer Fahrzyklus)
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEDS New European Driving Cycle)
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
NMHC	Non-Methane Hydrocarbons (Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe)
NMVOC	Non-Methane Volatile Organic Compounds (Flüchtige organische Verbindungen ohne Methan)
NO _x	Nitrogen Oxide (Stickstoffoxide)
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
o.g.	oben genannt
o.J.	ohne Jahr
PAJ	Petroleum Association of Japan
PEM	Polymer-Elektroly-Membran Brennstoffzelle
PKM	Personenkilometer
PM _x	Particulate Matter (Feinstaub)
ppm	parts per million
Requal	Autopilot mit optimaler Verteilung der Bonuszahlungen (rebate optimal)
s.	siehe
SCAQMD	South Coast Air Quality Management District of California
SCR	Selective Catalyst Reactor (Selektive Katalytische Reduktion von Stickoxiden)
SI	Spark Injection (Direkteinspritzende Ottomotoren)
SI-System	„Système International d’Unités, international gültiges Einheitensystem
s.o.	siehe oben
s.u.	siehe unten
sog.	sogenannte
spez.	spezifisch
SULEV	Super Ultra Low Emission Vehicle
TA-Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft vom 27.02.1986 (Vorschrift zum BImSchG)
THG	Treibhausgase
Tier 1	US Emission Standards (50.000mi)
Tier 2	US Full Useful Life Emission Standards (100.000mi)
Tkm	Tonnenkilometer
TLEV	Transitional Low Emission Vehicle
TM	Travel Multiplier
TMG	Tokyo Metropolitan Government
TREMOD	Verkehrs- und Emissionsmodell vom Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU)
TREMOVE	Verkehrs- und Emissionsmodell der EU
u.a.	unter anderem
UBA	Umweltbundesamt

ULEV	Ultra Low Emission Vehicle
US FTP	US Federal Test Procedure
v.a.	vor allem
VAT	Value Added Tax
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
VO	Verordnung
VSHK	Methode für Verteilungsfreie Statische Hierarchische Komponentenmodelle
z.B.	zum Beispiel
ZEV	Zero Emission Vehicle
z.T.	zum Teil

EINHEITEN

EUR	Euro	Währungseinheit
a	Jahr	Zeiteinheit
g	Gramm	Masseneinheit
h	Stunde	Zeiteinheit
kg	Kilogramm	Masseneinheit
m	Meter	Längeneinheit
min	Minute	Zeiteinheit
mm	Millimeter	Längeneinheit
s	Sekunde	Zeiteinheit
Stk.	Stück	Einheit für die Anzahl zählbarer Objekte
t	Tonne	Masseneinheit

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Problem

Der Mensch hat seit jeher den Wunsch, sich schneller, weiter und mit schwereren Lasten zu bewegen. Daher hat er schon immer nach technischen Möglichkeiten gesucht, die ihm dies ermöglichen. Im klassischen Altertum bewegten Wind und Menschenkraft Schiffe, die Entwicklung des Rades ermöglichte über viele Jahrhunderte das Ziehen von Wagen und die Eisenbahn entfesselte eine erste Revolution in der Mobilität. Mit Entwicklung des individuell und flexibel einsetzbaren Automobils kann der Mensch schließlich zu jeder Zeit an nahezu jeden Ort gelangen. Wirtschaftliche und kulturelle Fortentwicklung ist untrennbar mit Beweglichkeit, mit dem Transport von Menschen und Gütern verbunden.

Unter den Bedingungen des Zusammenwachsens von Volkswirtschaften mit unterschiedlichen Arbeits- und Produktionsbedingungen, der Verkürzung der Produktlebenszyklen und der sich schnell verändernden Kundenwünsche – also der Dynamik in den wirtschaftlichen und kommunikationstechnischen Austauschprozessen – entfaltet sich eine weltweite Massenmotorisierung, wobei die breite Motorisierung der aufstrebenden Volkswirtschaften Asiens noch bevorsteht. Der Individualverkehr bietet damit nicht nur Chancen, sondern auch Risiken hinsichtlich Ressourcenverbrauch, Treibhausgasemissionen, Umweltschutz, Sicherheit und Verkehrsstauungen. So bekommt zum einen die dauerhaft tragfähige Kraftstoffversorgung des Individualverkehrs eine immer wichtigere Bedeutung. Zum anderen ist die Gesundheit und Lebensqualität des Menschen in seiner natürlichen Umwelt zu bewahren, indem der – verkehrsbedingte – Ausstoß klimarelevanter Gase und lokaler Luftverunreinigungen vermindert wird.

Durch den Einsatz neuer Technologien können Belastungen weiter reduziert oder sogar ganz vermieden werden. Neue alternative Antriebe ergänzen den bisherigen technischen Fortschritt in Form von „Verändern, Verbessern und Optimieren“ herkömmlicher Aggregate. Die Ingenieure stehen dabei zum Teil erst am Anfang der Forschung und Entwicklung umweltfreundlicher Fahrzeuge, wobei die voneinander abweichende technische Leistungsstufe der Märkte und die wirtschaftlichen Möglichkeiten zu berücksichtigen sind. Irrtümer sind dabei nicht ausgeschlossen. In Gegenwart und Zukunft stehen unterschiedliche Konzepte der Motorisierung bereit: Optimierung der Otto- und Dieselschiffen sowie des gesamten Antriebsstrangs, Vorantreiben alternativer Kraftstoffe und gleichzeitiger Aufbau der Infrastruktur von Erdgas, Autogas, Biodiesel, Bio-Ethanol sowie Verfahren nach Fischer-Tropsch zur Synthese von Wasserstoff für den Betrieb in Brennstoffzellen und zur Verbrennung in modifizierten Benzinmotoren. Zu den weiteren Alternativen gehören der Elektro- und Hybridantrieb.

Neben den aus der weltweiten Motorisierung resultierenden Anforderungen hinsichtlich Umwelt- und Verkehrsbelastungen, müssen die Hersteller bereits im Produktentstehungsprozeß die Wünsche der Kunden berücksichtigen. Dabei sind Zielkonflikte zwischen Sicherheit,

Komfort, Qualität, Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit nicht auszuschließen – und das bei beschleunigter Wettbewerbsintensität und hohem Preisdruck. Um die Kundenwünsche zu erfüllen, weiten die Hersteller das Modellangebot weiter aus. Es zeigt sich, daß der Kunde dann bereit ist, ein besonderes (umweltfreundliches) Fahrzeug zu kaufen, wenn es seinen Vorstellungen entspricht und die in das Fahrzeug gesetzten Erwartungen erfüllt werden.

Nicht immer gehen die Wünsche dabei direkt von den Kunden aus, oft führt die breite Öffentlichkeit Veränderungen über die Politik herbei. Ein wesentlicher staatlicher Eingriff dient dem gesellschaftlichen Wunsch nach Eindämmung technologisch bedingter Nachteile. Es liegt im Interesse der Gesellschaft, die Vorteile des Automobils weiter zu festigen und die negativen externen Effekte des Individualverkehrs zu vermindern. Letztere entstehen durch Produktion und Nutzung, die sich (meist negativ) auf Dritte auswirken, ohne daß sich dies in den relativen Preisen niederschlägt. Zur Vermeidung negativer Umweltwirkungen erfolgt zunehmend der Einsatz ordnungsrechtlicher oder ökonomischer Instrumente, mit denen politische Entscheidungsträger in die Entscheidungen betrieblicher Entscheidungsträger eingreifen. Am Beispiel Kalifornien zeigt sich, wie – bedingt durch schlechte Luftqualität in Los Angeles – Abgasgesetze eingeführt werden, welche daraufhin ihre Signalwirkung überregional auf weitere US-Bundesstaaten und die Gesetzgebung anderer Länder entfalten. Die Ordnungspolitik bestimmt damit durch die Gestaltung der unternehmensexternen Rahmenbedingungen wesentlich Ausmaß und Richtung des Produktportfolios von Automobilherstellern und nimmt so massiv Einfluß auf Kosten und Marktakzeptanz von Technologien. Die durch die rechtlichen Eingriffe verursachten Wirkungen stellen sich jedoch häufig als ökologisch nicht treffsicher beziehungsweise ökonomisch nicht sinnvoll heraus.

So stehen Industrie und Politik gemeinsam in der Verantwortung, durch den kombinierten Einsatz von alternativen Kraftstoffen aus regenerativen Energiequellen und emissionsarmen Antriebskonzepten das Erreichen festgelegter Umweltziele sicherzustellen. Der Einstieg in eine langfristige Abkehr von fossilen Energieträgern im Individualverkehr muß hierbei in einer gesamtwirtschaftlich verträglichen Art und Weise erfolgen. Hierbei bildet die gegenseitige Beeinflussung von Kraftstoff- und Antriebsstrategien einerseits und die gegenseitige Beeinflussung von gesetzlichen Rahmenbedingungen und technischen Entwicklungspotentialen andererseits ein kompliziertes Netzwerk von Beziehungen, für das eine intuitive Prognose von Ursache und Wirkung nicht mehr möglich ist.

Vor diesem Hintergrund stellt sich zunehmend die Aufgabe, Auswirkungen ordnungspolitischer Maßnahmen auf wichtigen Märkten bereits vor der Umsetzung treffsicher abzuschätzen. Die hierfür eingesetzte Gesetzesfolgenabschätzung (engl.: Impact Assessment) verfolgt das Ziel der ex-ante Verbesserung und Vereinfachung rechtlicher Maßnahmen. Hierbei sind dauerhaft tragfähige Aspekte (Ökonomie, Ökologie, Soziales) zu beachten und Auswirkungen auf andere Wirtschaftszweige zu berücksichtigen.

Das ‚Impact Assessment‘ ist für die Untersuchung der Auswirkungen voneinander abweichender Politikoptionen vorgeschrieben (z.B. Biokraftstoffe, Fahrzeuge, Abfälle), wobei zur Vereinheitlichung des Vorgehens ein Leitfaden der Europäischen Kommission entwickelt wurde. Problematisch hierbei ist, daß eine konkrete Berücksichtigung der Reaktionen auf der Ebene von Unternehmen und Haushalten im Rahmen des durch politische Entscheidungsträger implizierten Impact Assessment meist nur über Befragungen der wirtschaftlichen Akteure erfolgt [EU-Kommission 2005]. Ein Stoffstromgerüst, welches ökologische Bewertungen erlaubt, fehlt; auch ein Finanzstrommodell zur Modellierung und Bewertung der ökonomischen Auswirkungen (umwelt-)rechtlicher Maßnahmen fehlt. Die Treffsicherheit der Maßnahme kann somit nicht garantiert werden.

1.2 Ziel und Lösungsweg

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, mit Hilfe eines geeigneten rechnergestützten Planungssystems eine Bewertung der komplexen Beziehungen zwischen Emissionsbelastungen, alternativen Antriebs- und Kraftstoffstrategien und den zur Umsetzung der Strategien anwendbaren umweltpolitischen Instrumentarien vorzunehmen. Rückkopplungen zwischen verhaltensorientierten, technischen und ökonomischen Größen sind bewußt in die Entscheidungsprozesse zu integrieren. Dazu sind geeignete Szenarien mit unterschiedlichen Rahmenbedingungen und Handlungsalternativen mit Hilfe eines Simulationsmodells zu analysieren. Damit soll dem sowohl politisch als auch unternehmerisch Handelnden ein Instrument an die Hand gegeben werden, mit dem er seine Entscheidungen sicherer treffen und die Folgen daraus besser antizipieren kann. Exemplarisch soll eine Konzentration auf die Automobilmärkte Deutschlands und Japans erfolgen.

Deutschland und Japan sind neben den USA, und hier insbesondere dem Bundesstaat Kalifornien, die Länder mit der am weitesten ausgeprägten und im internationalen Zusammenhang einflußreichsten Umweltpolitik. Die drei Automobilmärkte sind zudem strategisch wichtig, da sie – im Zuge der fortschreitenden Ausdifferenzierung der Marktsegmente – durch qualitatives Wachstum gekennzeichnet sind. Deutschland hat ebenso wie Japan eine vergleichbare volkswirtschaftliche Entwicklung genommen, beide Märkte sind gesättigt, durchlaufen einen Wandlungsprozesse und stehen im Vergleich zu den wachsenden und in Konkurrenz stehenden Regionen des Pazifik-Beckens und Indien weniger im Zentrum des Interesses. Nichtsdestoweniger ist Japan– wie Deutschland – weiter Vorreiter in der automobilen Technologieentwicklung (Umweltverträglichkeit, Sicherheit, Komfort) – und den Japanern eilt insbesondere in Asien der Ruf des umweltbewußten Automobilbaus voraus. Japan gilt als das Tor zu anderen asiatischen Märkten – Hersteller, die sich hier erfolgreich durchsetzen und die Erfahrungen aus dem japanischen Wettbewerb nutzen, haben gute Voraussetzungen für den Erfolg in anderen asiatischen Ländern. Gleiches gilt für den deutschen Markt und Europa. Beide Absatzgebiete sind zudem führend in dem Sinne, daß im Zuge der strengen Umweltgesetzge-

bung viele der neuesten und umweltfreundlichsten Produkte zuerst hier auf den Markt kommen.

Zur Erreichung des obengenannten Zieles wird der folgende Lösungsweg eingeschlagen:

Zunächst erfolgt in Kapitel zwei eine Analyse der aktuellen und zukünftigen Rahmenbedingungen des Individualverkehrs aus natürlichem, technischem, ökonomischem, politisch-rechtlichem und gesellschaftlichem Blickwinkel. Der Individualverkehr ist ein komplexes System aus Fahrzeugbestand, spezifischer Fahrleistung, Gesamtfahrleistung und Emissionen, dessen handelnde Personen, Aktivitäten und Restriktionen vorgestellt werden. Hierbei werden die (betriebsbedingten) Emissionen als Zielgröße ausgewählt, die das größte – durch konventionelle und alternative Antriebs- und Kraftstoffstrategien beeinflussbare – Minderungspotential aufweisen. Der Schwerpunkt der Untersuchung liegt auf Deutschland und Japan.

Kapitel drei beschäftigt sich mit politischen Instrumenten zur Internalisierung (negativer) externer Effekte, hier also verkehrsbedingter Luftschadstoff- und CO₂-Emissionen. Dafür sind nach festgelegten Kriterien spezielle Vor- und Nachteile dieser Lenkungsinstrumente herauszuarbeiten. Eine daran anschließende Betrachtung von Instrumenten im Verkehrsbereich ermöglicht die Analyse von Zielen, Maßnahmen, Chancen und Risiken politischer Eingriffe.

Aufbauend auf den Rahmenbedingungen und der Auswahl politischer Instrumente werden in Kapitel vier Anforderungen an Prognosemethoden und Bewertungsansätze hinsichtlich des ausgewählten Problems erarbeitet und die Verfahren nach verschiedenen Kriterien kategorisiert. Es ist dabei zu prüfen, inwieweit diese Verfahren zur Lösung von Planungsaufgaben im Verkehr herangezogen werden können. Hierbei ist auf geeignete Ansätze zur Abbildung der Produktstruktur, Fahrzeugalterungen und zur strategischen Planung von Instrumentenkombinationen für die Minderung verkehrsbedingter Emissionen einzugehen. Aufgrund der komplexen Planungsaufgabe im Verkehrssektor bietet sich zur Umsetzung des zu entwickelnden Planungsinstrumentes das Konzept der strategischen Entscheidungsunterstützungssysteme an. Zur Erstellung des Systems ist zunächst ein geeigneter Modellierungsansatz auszuwählen. Mit systemdynamischen Modellen und der Abbildung rückgekoppelter Stoff-, Informations- und Finanzflußstrukturen ist es dabei möglich, Einsichten in das Systemverhalten zu bekommen sowie die Wirkungen alternativer Strategien zu analysieren und zu bewerten.

In Kapitel fünf werden zunächst die grundlegenden Funktionsweisen systemdynamischer Simulationsmodelle vorgestellt. Aus dieser Kenntnis heraus wird ein auf diesen Modellen basierendes Entscheidungsunterstützungs-Werkzeug zur strategischen Planung des Individualverkehrs entworfen und eingesetzt. Hierbei erfolgt zunächst die Ermittlung und qualitative Bewertung der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge für den Bereich der Fahrzeugbestände, Fahrleistungen, Fahrzeugalterungen, Emissionen und das für Umweltausgaben zur Verfügung stehende Budget, bevor danach eine Quantifizierung durchgeführt wird. Neben einer Beeinflussung der exogenen Rahmenbedingungen sollen insbesondere die Auswirkungen von ökonomischen und ordnungsrechtlichen Instrumenten der Umweltpolitik untersucht werden. Da-

zu werden verschiedene Haushaltspolitiken in das Modell integriert. Durch das Schließen der zunächst noch offenen Regelkreise wird sodann eine automatisierte und zielorientierte Analyse der Wirksamkeit von umweltpolitischen Instrumenten und alternativer Antriebs- und Kraftstoffstrategien ermöglicht.

Gegenstand von Kapitel 6 ist die Anwendung des strategischen Planungsinstrumentes am Beispiel des Individualverkehrs in Deutschland und Japan. Mit Hilfe des Simulationsmodells wird in verschiedenen Szenarien schrittweise die Wirksamkeit alternativer Antriebs- und Kraftstoffstrategien und ihrer Ausprägungen durch den Einsatz von umweltpolitischen Maßnahmen analysiert. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen eine Bewertung der fiskalischen und emissionswirksamen Konsequenzen, so daß eine schrittweise Verbesserung des Instrumenteneinsatzes möglich wird. Die Ergebnisse der Bewertung der Alternativen sowie verschiedene Sensitivitätsanalysen werden vorgestellt. Die Ableitung von Handlungsempfehlungen aus der Fallstudie sowohl für betriebliche als auch für politische Entscheidungsträger schließt das Kapitel ab.

Kapitel sieben nimmt eine kritische Würdigung des entwickelten Ansatzes zur strategischen Verkehrsplanung mittels politischer Lenkungsinstrumente vor. Die räumliche, inhaltliche und branchenübergreifende Übertragbarkeit des Ansatzes auf andere Einsatzgebiete wird aufgezeigt und daraus weiterer Forschungsbedarf abgeleitet.

Abschließend erfolgt in Kapitel acht die Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit.

2 Rahmenbedingungen des Individualverkehrs

Der Individualverkehr verursacht in hohem Maße Abgas- und Kohlendioxidemissionen, Lärm und Flächenverbrauch sowie im weiteren Sinne auch Unfallschäden. Umwelteinwirkungen entstehen durch die Fahrzeugnutzung, die Fahrzeugproduktion, die Fahrzeugentsorgung und die notwendige Verkehrsinfrastruktur. Bei der Betrachtung der Luftverunreinigungen über den gesamten Produktlebenszyklus hat der Fahrzeugbetrieb den höchsten Anteil.

Im komplexen System Verkehr (Abschnitt 2.1) sind verschiedene Akteure und unterschiedliche Rahmenbedingungen der natürlichen Umwelt (Abschnitt 2.2) sowie Vorgaben und Restriktionen aus politisch-rechtlicher (Abschnitt 2.3), technisch-ökonomischer (Abschnitt 2.4) und gesellschaftlicher (Abschnitt 2.5) Sicht zu beachten. Diese aktuellen und zukünftigen Rahmenbedingungen sind Gegenstand der folgenden Betrachtungen.

2.1 Auswirkungen des Straßenverkehrs auf Mensch und Umwelt

Derzeit gibt es über 730 Millionen Kraftfahrzeuge weltweit. Allein im Jahr 2000 produzierten die Hersteller 42 Millionen neue Autos. Längst wächst die Zahl der PKW schneller als die Erdbevölkerung, wobei viele Entwicklungs- und Schwellenländer, allen voran Indien und China, erst am Anfang einer Massenmotorisierung stehen. Die Automobilindustrie erwartet, daß mittelfristig mehr als eine Milliarde Fahrzeuge weltweit zugelassen sind. Neben Abgasen emittieren PKW mit einem Kraftstoffverbrauch von insgesamt 13.000 Litern während der Nutzungsphase etwa 30 Tonnen Kohlendioxid, dem Hauptverursacher der Klimaerwärmung. Darüber hinaus sind die Ressourcen an fossilen Energieträgern wie Erdöl und Erdgas begrenzt, was einen schrittweisen Anstieg der Energiepreise zur Folge hat.

Seit neunzig Jahren ist der Verbrennungsmotor der vorherrschende Antrieb, der über eine lange Kette von Energieverlusten bei Kurbelwelle, Schaltung und Getriebe nur bis zu 27 Prozent an reinem Vortrieb bringt.¹ Im Prinzip gibt es zwei (technische) Wege, die Emissionen zu senken. Zum einen lassen sich die herkömmlichen Techniken weiter verbessern. Zum anderen besteht die Möglichkeit, neue Techniken und Werkstoffe zu entwickeln. Die Kaufpreise der Fahrzeuge sind (zunächst) hoch, da beide Strategien – in der Anfangsphase – mit hohen Entwicklungskosten, kleinen Stückzahlen und teuren Materialien verbunden sind. Fraglich ist zudem, ob der Kunde mit seinem Wunsch nach mehr Komfort ein solch ‚optimiertes‘ Fahrzeug wünscht. So entfallen mittlerweile etwa 25 Prozent des Kraftstoffverbrauchs auf elektronisches Zubehör wie zusätzliche Elektromotoren zum Öffnen der Fenster, für Servolenkung, Klimaanlage oder integrale Multimediansätze.

Die Fahrzeuge verursachen dabei sowohl in der Nutzungs-, als auch in der Produktions- und Entsorgungsphase Umweltbelastungen. Die ökologische Lebenszyklusanalyse muß zur Beur-

¹ Anm.: Das gilt nur für moderne kraftstoffeffiziente Dieselfahrzeuge.

teilung von Umweltbelastungen genaugenommen den Materialeingang und -ausgang von allen Phasen aufnehmen: Herstellung, Nutzung und Verwertung [Köhn 1996, S. 449ff.; IFEU 2002]. Gleichwohl soll im folgenden nur die Nutzungsphase untersucht werden, da – wie das Beispiel des Volkswagen Passat in Abbildung 2-1 zeigt – bei Betrachtung des gesamten Lebenszyklus eines PKW in Bezug auf Energieverbrauch und Schadstoffemissionen die Phase des Fahrzeugbetriebs gegenüber den Phasen der vorgelagerten Produktions-, Energieerzeugungs- und Verteilungskette sowie der nachgelagerten Altautoverwertung- und -entsorgung dominiert [SRU 2005, S. 41f.].

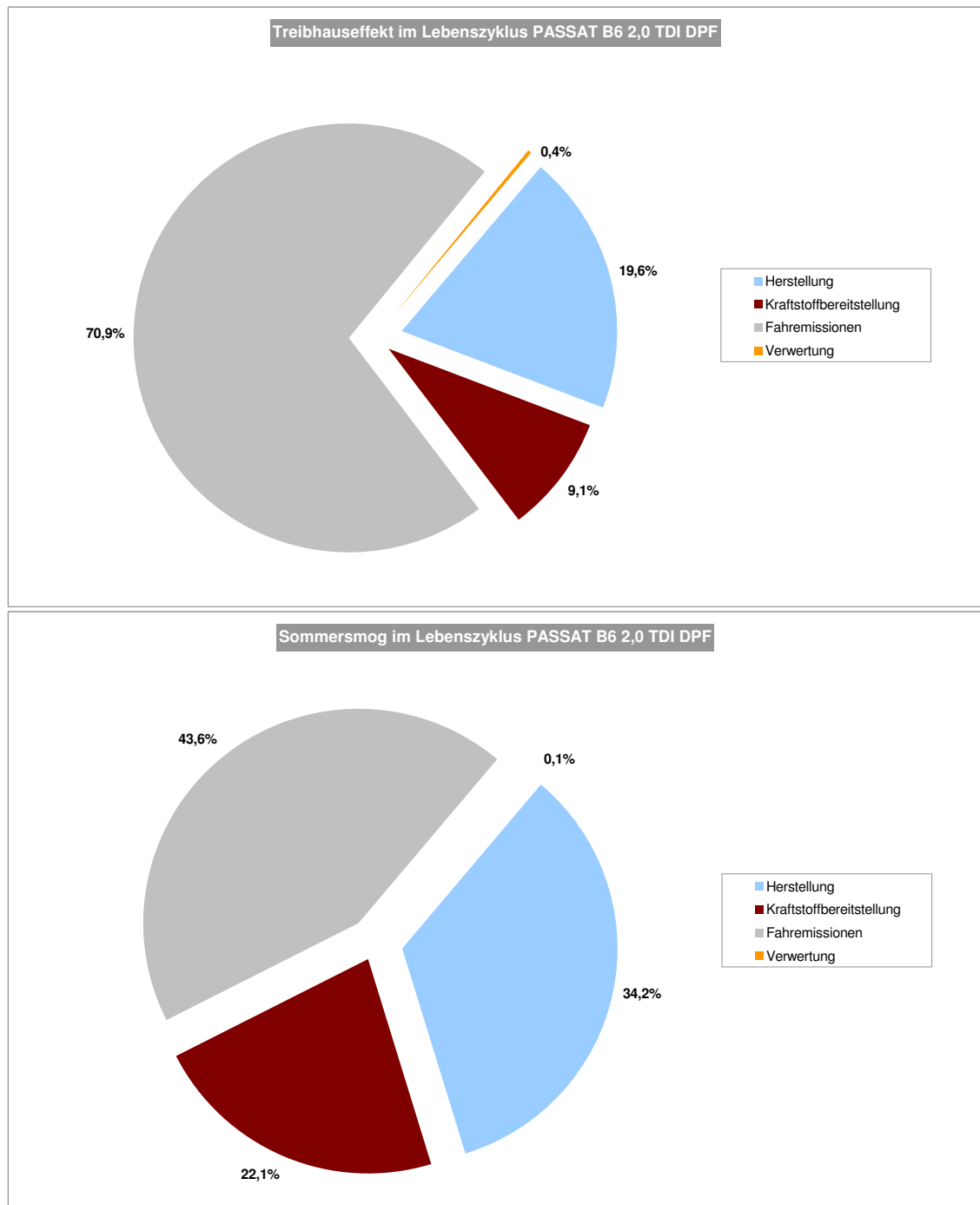


Abbildung 2-1: Die Bedeutung der Nutzungsphase in Bezug auf den Gesamtlebenszyklus eines Fahrzeugs [Eigene Darstellung nach Goldmann 2005; Volkswagen 2007b].

Für die Nutzungsphase sind die bestimmenden Faktoren

- der Fahrzeugbestand nach Fahrzeugvarianten,
- die spezifischen Emissionen
- die Fahrleistung der Fahrzeuge
- der spezifische Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch
- sowie die Kraftstoffart und Kraftstoffzusammensetzung [Schmidt 2003, S. 6].

Umweltpolitische Ansatzpunkte liegen – neben der Ausschöpfung technischer Reduktionspotentiale – in der Verkehrsvermeidung durch Entkopplung des Verkehrs- vom Wirtschaftswachstum² und der Verlagerung auf andere Verkehrsträger. Technische Maßnahmen sind dabei aus Sicht der Akteure ökonomisch vertretbarer und politisch leichter umzusetzen. Aus diesem Grund konzentrieren sich die Ausführungen auf Möglichkeiten der technischen Verbesserung. Dabei stehen Deutschland und Japan sowie die USA mit ihrer umweltpolitischen Leitfunktion im Mittelpunkt der Betrachtung, da diese Länder sowohl über die politisch-institutionellen und gesellschaftlichen Voraussetzungen für eine ökologische Modernisierung, als auch über finanzielle und technische Ressourcen zur Entwicklung neuer Techniken verfügen.

2.2 Natürliche Rahmenbedingungen

Die Erdatmosphäre setzt sich aus Sauerstoff, Stickstoff, Wasserdampf und Spurengasen zusammen und ist das Ergebnis sich stabilisierender Rückkopplungsprozesse der Natur. In den letzten hundert Jahren beobachten Wissenschaftler erhöhte lokale Luftverunreinigungen in Ballungszentren und eine zunehmende Erderwärmung. Diese Veränderungen werden der exponentiell anwachsenden Weltbevölkerung im Zuge der Industrialisierung und – als Folge davon – einem zunehmenden Energieverbrauch in Industrie, Haushalte und Verkehr zugeschrieben.

Der politische und betriebliche Entscheidungsträger muß Informationen über Umweltbelastung und Ressourcenverfügbarkeit durch den Individualverkehr sammeln, aufbereiten und auswerten. Abschnitt 2.2.1 erläutert die stofflichen Belastungen der Natur durch Luftverunreinigungen. Abschnitt 2.2.2 untersucht die klimatischen Rahmenbedingungen. Abschnitt 2.2.3 setzt sich mit den begrenzten Ressourcen auseinander. Abschnitt 2.2.4 untermauert die Auswirkungen des Individualverkehrs auf Mensch und Umwelt und zeigt naturräumliche Besonderheiten in Deutschland und Japan auf. Abschnitt 2.2.5 faßt die Ergebnisse zusammen.

² Annahme: Bei gegebener Technologie und gegebenem Verbraucherverhalten je Endprodukteinheit wird eine bestimmte Schadstoffmenge emittiert, d.h. mit steigendem Volkseinkommen nimmt die Umweltqualität ab. Durch staatliche Maßnahmen läßt sich jedoch diese negative Beziehung vermindern [Roloff 1995, S. 232].

2.2.1 Lokal und kurzlebig wirkende Luftverunreinigungen

Die regional und lokal wirkenden Bestandteile der Atmosphäre wie Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO_x)³, diverse teilverbrannte Kohlenwasserstoffe („Hydrocarbon“, HC) und Staubpartikel sind kurzlebig mit einer Lebensdauer von nur wenigen Stunden bis zu einigen Monaten und beeinflussen die Luftqualität in Form von Smog⁴ meist direkt in der Nähe des Verursachers [Laforsch 1999, S. 19f.].⁵ Photochemischer Smog aus Abgasen entsteht, wenn Stickoxide, Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe intensiver Sonnenstrahlung ausgesetzt sind (Sommersmog). Dabei bilden sich oxidierende Substanzen (Bodennahe Ozonbildung) sowie Schwebeteilchen, welche die Luft trüben und die Sichtweite herabsetzen [Lenz und Cozzarini 1998, S. 32f.]. Feinstaub (1 bis 10µ)⁶ und Aerosole (kleiner als 1µ) als sogenannter Schwebstaub im Abgas verstärken die Smogbildung und entstehen durch Reifenabrieb, Bremsen, Kupplungsbeläge und vorwiegend bei unvollständiger Verbrennung im Dieselmotor. Beim konventionellen Ottomotor sind die Partikelemissionen vernachlässigbar gering [Bank 2000, S. 437f., 701ff.].

Den Schwebstaub bezeichnet die Wissenschaft auch als ‚Particulate Matter (PM)‘. Feinstaub und Aerosole bestehen – in Abhängigkeit von Verbrennungsverfahren und Motorbetriebszustand – hauptsächlich aus einer Aneinanderkettung von Kohlenstoffteilchen (Ruß). An den Ruß lagern sich unverbrannte oder teilverbrannte Kohlenwasserstoffe sowie zusätzlich Aldehyde mit aufdringlichem Geruch an. Am Ruß binden sich auch Kraftstoff- und Schmierölaerosole (in Gasen feinstverteilte feste oder flüssige Stoffe) sowie Sulfate [Bosch 2002, S. 603; UBA 2005b].

In kalifornischen Ballungsräumen, wo durch die besondere geographische Lage wenig Luftaustausch stattfindet, ist das Phänomen photochemischen Smogs zuerst beobachtet worden. Das hängt mit der Tallage zusammen, die stabile Inversionswetterlagen besonders begünstigt, wenn sich vom Meer kühle Luft unter die erwärmte Stadtluft schiebt. Hohe Bevölkerungszahlen, ein hoher Motorisierungsgrad sowie lange und intensive Sonneneinstrahlung begünstigen diesen Prozeß [Bank 2000, S. 527]. Bei hoher Konzentration führen Stickoxide zur Schleimhautreizung. Feinstaub führt zu Atembeschwerden, Erkrankungen der Lungenfunktion, zur Erhöhung der Infektionsanfälligkeit sowie zu allergischen Reaktionen und gilt als krebserregend. Kohlenstoffmonoxid verringert die Sauerstoffaufnahmefähigkeit des Blutes und führt zur Vergiftung des Körpers. Kohlenwasserstoffe sind mit einem hohen Anteil in Abgasen

³ Gemische von Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid werden allgemein in der Kurzform NO_x, im weiteren als Stickstoffoxide oder kurz Stickoxide, zusammengefaßt [Lenz und Cozzarini 1998, S. 33].

⁴ Kurzwort aus engl. **s**moke (Rauch) und **f**og (Nebel) [Lenz und Cozzarini 1998, S. 32].

⁵ Wenn diese lokalen Bestandteile durch Wind in große Höhen aufsteigen und über weite Strecken verfrachtet werden, können sie die Luftqualität auch überregional beeinflussen [Lenz und Cozzarini 1998, S. 6].

⁶ µ=1 Mikrometer (10⁻⁶)

enthalten und gelten bei Dauereinwirkung als krebserregend. Teiloxidierte Kohlenwasserstoffe (z.B. Aldehyde, Ketone) bilden unter Sonneneinwirkung Folgeprodukte, die bei Dauereinwirkung von bestimmten Konzentrationen ebenfalls im Ruf stehen, krebserregend zu sein [ACEA 2002a; HEI 1999; Bosch 2002, S. 602f., UBA 2003d]. Der genaue kausale Zusammenhang zwischen Abgasemissionen und toxischem Potential ist dabei in der Medizin umstritten. Insbesondere das Zusammenwirken einer Vielzahl von Schadstoffen aus unterschiedlichen Quellen entzieht sich wissenschaftlicher Erkenntnisse [Bruch 2005; Wichmann 2003; Spallek 2005; Metz 2004; UBA 2005a].

2.2.2 Überregional und langlebig wirkende Luftverunreinigungen

Im Unterschied zu den obengenannten Luftschadstoffen haben überregional wirkende Komponenten wie Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), halogenierte Kohlenwasserstoffe (HKW) und Distickstoffmonoxid bzw. Lachgas (N_2O), die sich gleichmäßig verteilt und langlebig mehrere Jahre oder auch Jahrhunderte in der Atmosphäre aufhalten, keine ‚direkte‘ negative Wirkung auf die menschliche Gesundheit. Diese Bestandteile beeinflussen die gesamte Atmosphäre und tragen zum Treibhauseffekt bei oder verändern die schützende Ozonschicht in der Stratosphäre, wobei Wissenschaftler Kohlendioxid das größte Erwärmungspotential⁷ beimessen [Laforsch 1999, S. 19f., Lenz und Cozzarini 1998, S. 7; SRU 2005, S. 41ff.]. Der Treibhauseffekt beruht darauf, daß das Absorptionsverhalten von Bestandteilen der Atmosphäre in den Spektralbereichen des Lichts nicht gleich ist. Die der Erde durch die Sonneneinstrahlung zugeführte Energie wird wieder in das Weltall abgestrahlt. Das einfallende Licht wird dabei praktisch nicht, die abgegebene Wärmestrahlung von den obengenannten Spurengasen mehr oder weniger stark absorbiert. Die Abstrahlung von Wärmeenergie wird durch die Gase in der Atmosphäre behindert. Die Folge ist ein Temperaturanstieg an der Erdoberfläche, der das Leben auf der Erde letztlich ermöglicht [IPCC 2001a, S. 89f.].

Kohlendioxid und andere Spurengase aus Industrie, Haushalten und Verkehr verändern die natürliche Zusammensetzung der Erdatmosphäre und tragen zu einem „anthropogenen Treibhauseffekt“ bei [UBA 2001, S. 127; UBA 2003a, Lahmann 1996, S. 57]. Die vom Menschen verursachten Emissionen werden insbesondere bei der Verbrennung von Öl, Kohle und Gas freigesetzt. Sie stören dabei auch das dynamische Gleichgewicht der Ozonkonzentration in der Stratosphäre, deren Absorptionseigenschaften (Ozonschicht) die Erde vor schädlicher ultravioletter Strahlung schützen. Der obengenannte anthropogene Treibhauseffekt verstärkt

⁷ Um die Bedeutung einzelner Treibhausgase untereinander beurteilen zu können, finden sogenannte ‘ CO_2 -Äquivalente’ Anwendung. Dabei wird Kohlendioxid als Referenzgröße auf den Wert eins gesetzt und das Erwärmungspotential (Global Warming Potential, GWP) der anderen Gase in Abhängigkeit der atmosphärischen Lebensdauer als ein Vielfaches betrachtet. Wegen der großen Menge wird Kohlendioxid so (absolut) die größte Wirkung am anthropogenen Treibhauseffekt zugeschrieben, auch wenn das Erwärmungspotential im Vergleich zu anderen Treibhausgasen niedriger ist [Lenz und Cozzarini 1998, S: 10f.].

sich [Brauer 1996, UBA 2003b]. Als Folge steigt die mittlere globale Temperatur drastisch (vgl. Abbildung 2-2). Wissenschaftler rechnen bis Ende des Jahrhunderts mit einem weiteren Temperaturanstieg von 1,4 bis 5,8°C, einer Anhebung des Meeresspiegels um 10 bis 90 cm, dramatischen Änderungen bei den Niederschlägen und einer Häufung meteorologischer Extremereignisse. Daraus resultieren hohe volkswirtschaftliche Schäden [UBA 2003a; IPCC 2001b, S. 646; PWC 2002, S. 6, Münchener Rück 2006].

Bereits 1992 hat die internationale Gemeinschaft in der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen in Rio de Janeiro die Notwendigkeit einer internationalen Klimapolitik anerkannt [Simonis 1996, S. 48]. In dem 1997 verhandelten Protokoll von Kyoto haben sich 38 Industriestaaten erstmals völkerrechtlich verbindlich dazu verpflichtet, ihre Treibhausgase zwischen 2008 und 2012 durchschnittlich um 5,2 Prozent gegenüber 1990 zu senken.

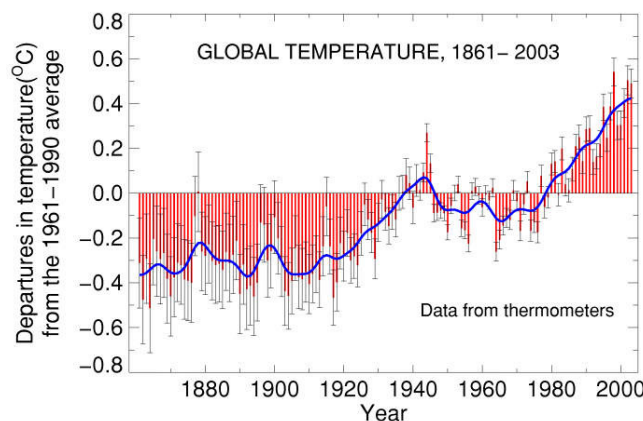


Abbildung 2-2: Abweichung des globalen Mittels der Lufttemperatur an der Erdoberfläche vom langfristigen Mittel 1961 – 1990 [UBA 2003a]

Anthropogene Quellen sind für zwei Drittel der weltweiten Methan- und ein Drittel der Lachgasemissionen verantwortlich. Bei modernen Personenkraftwagen spielen diese Treibhausgase indes keine Rolle. Die herkömmlichen Abgaskomponenten Kohlenmonoxid, Stickoxide und unverbrannte Kohlenwasserstoffe zählen zu den sogenannten indirekt klimawirksamen Spurengasen, die durch die Änderung der Ozonkonzentration in der Troposphäre die Strahlung beeinflussen können und somit zu einer zusätzlichen Erwärmung führen. Mit der Einführung des geregelten Dreiwege-Katalysators bei Ottomotoren sind diese Komponenten bedeutungslos. Kohlendioxidemissionen sind bei Verbrennung fossiler Kraftstoffe dem Kraftstoffverbrauch direkt proportional und es gibt für dieses Gas keine Rückhaltetechnik (siehe Abschnitt 2.3). Der Beitrag des weltweiten Personenkraftwagen- und Nutzfahrzeugverkehrs an den gesamten – natürlichen und anthropogen verursachten – Kohlendioxidemissionen beträgt etwa 0,5 Prozent. Trotz dieses relativ kleinen Betrages betrachten Wissenschaftler die Menge als eine „zusätzliche“ Emission, welche das natürliche CO₂-Gleichgewicht und damit das weltweite Klima negativ beeinflussen kann [Lenz und Cozzarini 1998, S. 18ff.; Cansier 1996, S. 153].

2.2.3 Ressourcenbeanspruchung

Die industrialisierten Volkswirtschaften entnehmen die wichtigsten natürlichen Ressourcen aus Lagerstätten in der Erdkruste. Nach menschlichen Maßstäben sind die – über viele Millionen Jahre – entstandenen Anreicherungen fossiler Energieträger (z.B. Mineralöl, Erdgas) als ‚nicht erneuerbar‘ einzuordnen. Bestimmte Rohstoffe wachsen dagegen in natürlichen Wachstumsprozessen in kurzer Zeit immer wieder nach (z.B. Biomasse) [Ströbele 1996, S. 187f.]. Derzeit wird Strom- und Wärmeenergie mit einem Anteil von 90 Prozent weltweit vorrangig auf Grundlage der nicht-erneuerbaren (fossilen) Brennstoffe erzeugt. Der fossile Energieverbrauch durchläuft in den nächsten Jahrzehnten voraussichtlich das Maximum und erneuerbare Energien müssen danach die zusätzlich benötigte Energie abdecken [Behrens 1990; IEA 2006; Schmitt und Düngen 1996, S. 22].

Die sich langfristig abzeichnenden Engpässe bei fossilen Ressourcen, das Steigen der Förderkosten bei Vorkommen in abgelegenen Regionen und die Anfälligkeit der Energieversorgung durch politische Unsicherheiten führen zu hohen Abhängigkeiten von Ländern in instabilen Gegenden (z.B. Mittlerer Osten, Rußland, Venezuela). Diese Abhängigkeit betrifft nicht nur rohstoffarme Länder wie zum Beispiel Deutschland und Japan, sondern auch die USA. Im Welterdölmarkt bahnen sich zudem strukturelle Veränderungen an. Die internationale Nachfrage nach Öl steigt, da Staaten wie China und Indien schrittweise zu den industrialisierten Ländern aufschließen und ihren Anteil am Erdöl einfordern. Gleichzeitig herrschen wegen der – für die Produzenten – negativen Preisentwicklung in der Vergangenheit Engpässe bei Förder- und Raffineriekapazitäten; Produktionsstätten und Lagerstättenexplorationen lassen sich bei steigenden Erdölpreisen indes nicht kurzfristig aufbauen [Dries 2004; VDI 2003, S. 439ff.].

Neue technische Nutzungsmöglichkeiten für erneuerbare Energieressourcen, wie zum Beispiel Solarstrom, Windenergie, Geothermie, Biomasse und Wasserkraft, sind in der Entwicklung. Fraglich ist, ob es eine Verschiebung der Energieversorgung des Individualverkehrs hin zu alternativen Antrieben und Kraftstoffen gibt und wie schnell der Wandel erfolgt [Braess und Seiffert 2003, S. 331]. Verbraucherverhalten, wie der in den USA festzustellende Verkaufsrückgang bei Geländewagen mit hohem Kraftstoffverbrauch (Sports-Utility-Vehicles, SUV), und dauerhaft hohe Kraftstoffpreise könnten diesen Entwicklungsprozeß im Verkehrsbereich beschleunigen [Ball und White 2005, Boudette 2005]. In Deutschland haben sich die Kraftstoffpreise in den letzten 40 Jahren nominell erhöht. Sie unterlagen dabei allerdings erheblichen Schwankungen, ausgelöst durch die krisenhaften Angebotsschocks in den 1970er und 1980er Jahren sowie den immer wieder veränderten Mineralölsteuersätzen. Seit 1993 ist ein kontinuierlicher Aufwärtstrend der Preise zu erkennen. Betrachtet man jedoch die Realpreise für Benzin und Diesel, so lagen die realen Kraftstoffkosten im Jahr 2003 noch unterhalb der Kosten von 1960. Unter Berücksichtigung des realen Pro-Kopf-Einkommens zwischen 1960 und 2003, das um 162 Prozent gestiegen ist, so ist die tatsächliche Belastung der

Pkw-Fahrer durch die Kraftstoffkosten heute immer noch geringer als vor 40 Jahren [SRU 2005, S.73]. Nach Untersuchungen des Kieler Instituts für Weltwirtschaft werden sich die Kraftstoffpreise gleichwohl mittel- und langfristig erheblich über dem heutigen Niveau einpendeln [Klepper 2001, S. 4ff.].

Die Veränderung der umweltrelevanten Entwicklungsschwerpunkte findet sich in Abbildung 2-3.

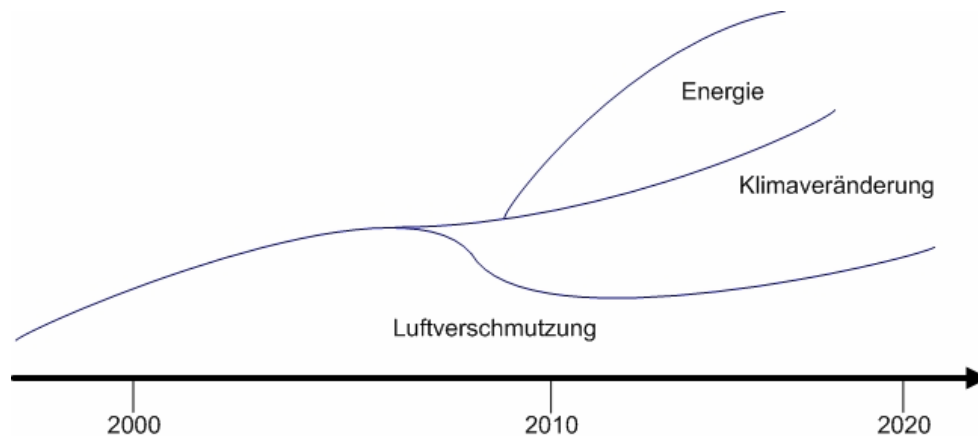


Abbildung 2-3: Veränderung der umweltrelevanten Entwicklungsschwerpunkte [Eigene Darstellung nach Hadler 2005]

2.2.4 Verkehrs- und Belastungssituation im Vergleich

Die Schadstoffemissionen des Straßenverkehrs in Deutschland und Japan haben – mit Ausnahme von CO₂ – in den letzten Jahren deutlich abgenommen. Das betrifft insbesondere die Abgasemissionen von Kohlenmonoxid, Stickoxiden, flüchtigen Kohlenwasserstoffen ohne Methan, Schwefeldioxid und Staubpartikel. Trotzdem haben die Schadstoffemissionen des Verkehrssektors noch immer einen großen Anteil an den Gesamtemissionen [SRU 2005, S. 41f.; Ohta 2004].

2.2.4.1 Verkehrs- und Belastungssituation in Deutschland

Deutschland befindet sich im Klimabereich der gemäßigten Zone, speziell im Übergangsbereich zwischen dem Seeklima im Westen Europas und dem kühlen Kontinentalklima im Osten. Das Übergangsklima ist gekennzeichnet durch ganzjährige, im Sommer erhöhte Niederschläge und durch milde Temperaturen, deren Schwankungen nach Osten hin zunehmen. Großräumig betrachtet bestehen zwischen Nord-, Mittel- und Süddeutschland geringe klimatische Unterschiede. In Ballungszentren und ökologisch sensiblen Gebieten, wie zum Beispiel den Alpen, können sich die Umweltbelastungen in Abhängigkeit vom Verkehrsfluß konzentrieren [Knippert und Wagner 2003; Liedke und Marcinek 1994].

Der PKW-Bestand in Deutschland beträgt 45 Millionen Fahrzeuge in 2004 mit degressiv steigender Tendenz. Der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch des deutschen PKW-Fahrzeugbestandes ist in den Jahren von 1991 bis 2002 um 6 Prozent gesunken. Infolge des

Verbrauchsrückgangs sind – schrittweise – auch die spezifischen CO₂-Emissionen neuzugelassener PKW gesunken. Die durchschnittlichen Fahrleistungen sind je nach Antriebsart sehr unterschiedlich: Mit 20.000 km pro Jahr ist die Fahrleistung von Dieselfahrzeugen um drei Viertel höher als bei PKW mit Ottomotor [SRU 2005, S. 150, 161; KBA 2004b].

Der Anteil des Straßenverkehrs an den gesamten Feinstaubemissionen liegt bei etwa 14 Prozent im Jahr 2001 (34kt/Jahr). Die Kohlenmonoxidemissionen im Straßenverkehr haben sich wegen gesetzlicher Abgasgrenzwerte von 6527kt im Jahr 1990 auf 2289kt im Jahr 2001 verringert. Trotzdem ist der Verkehrssektor im Jahr 2001 noch für etwa 40 Prozent der CO-Emissionen verantwortlich. Die NO_x-Emissionen verringerten sich trotz steigendem Fahrzeugbestand von 1990 bis 2001 von 1343kt/ Jahr auf 835kt/ Jahr aufgrund von Abgasnachbehandlungssystemen und verschärfter Abgasgesetzgebung. Gleichwohl ist der Verkehrssektor (PKW- und LKW-Sektor) noch immer für etwa 50 Prozent der gesamten Stickoxidemissionen in Deutschland im Jahr 2001 verantwortlich. Der hohe Anteil ist auf die starke Verbreitung von Dieselfahrzeugen zurückzuführen. Der PKW-Sektor hat einen Anteil von über 15 Prozent an den gesamten deutschen Kohlendioxidemissionen im Jahr 2001 mit steigender Tendenz. Mit 167 Mt im Jahr 2001 liegen die CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs um 17 Mt höher als im Jahr 1990 (siehe Tabelle 2-1) [UBA 2003c; UBA 2006].

Den erheblichen Verbesserungen der spezifischen Schadstoffemissionen von Neuwagen stehen der vergleichsweise langsame Erneuerungszyklus der gesamten Fahrzeugflotte sowie gestiegene Fahrleistungen gegenüber. Anhaltspunkte für die Abschätzung der zukünftigen Verkehrsentwicklung bietet der Bundesverkehrswegeplan. Das sogenannte Szenario H von 1992 unterstellt bei einem Verzicht auf umwelt- und verkehrspolitische Maßnahmen für den Zeitraum von 1991 bis 2010 ein Wachstum der Personenverkehrsleistungen von knapp 20 Prozent. In dem Zeitraum von 1972 bis 1991 sind diese sogar um 59 Prozent gestiegen. In einem aktuelleren auf der Prognose für die Bundesverkehrswegeplanung beruhenden Trendszenario nehmen die Straßenpersonenverkehrsleistungen um 28 Prozent zu [Münch 1995, S. 218; SRU 2005, S. 79f., 150].

Tabelle 2-1: Anteil des Straßenverkehrs an den Luftschadstoffemissionen in Deutschland^{1)2) 3)} [UBA 2006]

	1970 ³⁾	1980	1990	2000	2004
Kohlenmonoxid					
Emissionen in Millionen Tonnen	16,1 (13,5)	14,1 (11,0)	12,1	5,0	4,1
Anteil des Straßenverkehr in %	49 (55)	59 (68)	54	49	42
Emissionen des Straßenverkehrs in 1000t	7865 (7417)	8235 (7527)	6527	2465	1700
Anteil der Personenkraftwagen in %	99	98	90	84	84
Anteil der Nutzfahrzeuge in %	1	1	6	9	5
Stickstoffoxide					
Emissionen in Millionen Tonnen	2,7 (2,1)	3,3 (2,6)	2,9	1,9	1,6
Anteil des Straßenverkehr in %	23 (27)	35 (41)	47	54	47
Emissionen des Straßenverkehrs in 1000t	620 (550)	1160 (1080)	1343	1000	732
Anteil der Personenkraftwagen in %	60	66	61	29	35
Anteil der Nutzfahrzeuge in %	40	34	39	71	64
Kohlendioxid					
Emissionen in Millionen Tonnen	1038 (740)	1115 (792)	1021	868	868
Anteil des Straßenverkehr in %	7 (9)	10 (13)	15	20	18
Emissionen des Straßenverkehrs in 1000t	77.000 (68.000)	117.000 (105.000)	150.262	171.165	160.278
Anteil der Personenkraftwagen in %	74	76	58	18	22
Anteil der Nutzfahrzeuge in %	26	24	41	81	77
Staub					
Emissionen in Millionen Tonnen	3,3 (1,3)	2,6 (0,7)	2,5	0,2	0,2
Anteil des Straßenverkehr in %	1 (2)	2 (4)	2 2A	12 25A	10 24A
Emissionen des Straßenverkehrs in 1000t	29 (22)	37 (30)	38 62A	29 59A	22 53A
Anteil der Personenkraftwagen in %	35	28	33	28	37
Anteil der Nutzfahrzeuge in %	65	72	67	72	63
¹⁾ Klammerangaben beziehen sich auf die alten Bundesländer.					
²⁾ Die mit einem A gekennzeichneten Staubemissionsangaben beinhalten Abriebemissionen (Bremsen, Reifen, Straßenbelag).					
³⁾ Ab 1980 sind auch Restemissionen ausgewiesen (z.B. motorisierte Zweiräder)					

In erheblichem Maße umweltentlastend wirkt sich gleichwohl die Verringerung der spezifischen Emissionen aus, die in der Hauptsache auf die Entwicklung neuer Antriebstechnologien zurückzuführen ist (siehe Abschnitt 2.3) [Hopf und Voigt 2002].

2.2.4.2 Verkehrs- und Belastungssituation in Japan

Die kleinräumige Landschaftsform Japans durchzieht das Hinterland in zahlreichen Becken und löst sich auch an den Küsten in nur mittelgroßen Schwemmlandebenen auf. Infolge dieser Kleinkammerung sind nur wenige Tieflandsgebiete, die eine Landesfläche von ungefähr 25 Prozent umfassen, für die wirtschaftliche Nutzung und Besiedelung geeignet. Die Bevölkerungsverteilung ist ein Spiegelbild dieser räumlichen Gegebenheiten; es ergibt sich eine im Vergleich zu Deutschland höhere Bevölkerungsdichte von 1200 E./km². Die Verdichtungsprozesse innerhalb der Kulturlächen als Folge von Industrialisierung und Landflucht wiegen dabei ungleich stärker und machen Japan mit Zählbezirken von bis zu 4.000 E./km² zu einem der am dichtest besiedelten Länder der Erde [Flüchter 1998, S. 16ff.].

Die dicht besiedelten Zählbezirke sind im wesentlichen in den Ballungsräumen an der pazifischen Küste verbreitet, besonders in den Metropolregionen Tōkyō, Ōsaka/ Kōbe und Nagoya. Das relativ kleine und eng ausgelegte Straßennetz ist Folge der geographischen Situation und bewirkt Staus, Stop-and-go-Verkehr und Durchschnittsgeschwindigkeiten von unter 15 km/h. Die Folge sind extrem hohe lokale Luftverschmutzung und steigende Treibhausgasemissionen.

Das feuchtwarme Klima verstärkt die Umweltbelastungen noch. Bei der Temperatur zeigen sich im Sommer zwischen Okinawa (Juli-Mittel 26-28°C) und Hokkaidō (16-20°C) zwar nur geringe Wärmedifferenzen. Maritime Tropikluft führt aber im Sommer – mit Ausnahme von Hokkaidō – zu schwülwarmen Temperaturen in ganz Japan und sorgt beim Aufgleiten auf die kalte Polarluft für heftige Niederschläge mit extrem hoher Luftfeuchte (Sommermonsunzeit). Der für den Beginn dieser Monsunzeit ursächliche Wechsel der Windrichtung entsteht an der Polarfront, an der die maritime Tropikluft auf kontinentale sibirische Luftmassen aufgleitet. Wenn diese Front ab Juli weiter nach Norden wandert, lassen die Niederschläge in den Ballungsräumen Mitteljapans zwar nach, es bleibt aber schwül. Die südlichen Winde sind dabei schwach, ein Luftaustausch findet, insbesondere in den Ballungszentren, nicht statt [Flüchter 1998, Hassenpflug 1998, S. 9f.; JMA 2005].

Aufgrund der hohen Bevölkerungs- und Verkehrsdichte in den Metropolen und verstärkt durch das schwülwarme Klima ist die Luftverschmutzung sehr hoch. Die wichtigsten Abgas-komponenten sind dabei Stickoxide, Kohlenstoffmonoxid, Kohlenwasserstoffe und Feinstaub.

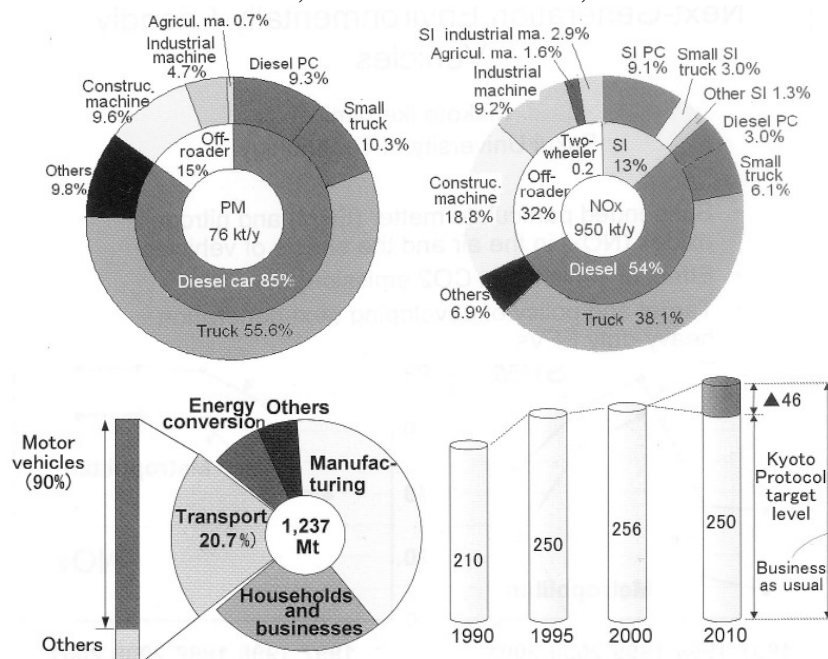


Abbildung 2-4: Prozentualer Anteil der Fahrzeugsegmente am Stickoxid- und Feinstaubausstoß und prozentualer Anteil des Transports am Ausstoß von Kohlendioxid [Ministry Of Environment 2000].

Der PKW-Bestand beträgt 70 Millionen Fahrzeuge [VTT 2000b; Ohta 2004]. Innerhalb des Gesamtbestandes steigt der Anteil umweltfreundlicher Fahrzeuge, der sogenannten „Low

Emission Vehicles (LEV)' seit 2001 signifikant an (siehe Tabelle 2-2) [VTT MTN 2003e; VTT MTN 2003f; VTT MTN 2002d; VTT MTN 2002e; Fourin 2002; Fourin 2001].

Tabelle 2-2: Absatzzahlen der ‚Clean Energy Vehicles‘ und ‚Low Emission Vehicles‘ [JAMA 2004c, S. 1ff.; Marklines 2005a, Marklines 2005b]⁸⁹

		2001	2002	2003	2004
Clean Energy Vehicles	Elektrofahrzeuge	150	183	79	49
	Hybridfahrzeuge	12.950	24.844	22.269	42.423
	CNG-Fahrzeuge	2.447	4.201	3.972	3.852
	Methanolfahrzeuge	0	0	0	0
	LPG-Fahrzeuge	2.050	3.157	2.194	3.244
Low Emission Vehicles	ULEV 2005	0	0	0	73.426
	LEV 2005	0	0	0	363.089
	ULEV 2000	17.959	242.445	1.639.782	2.521.106
	LEV 2000	299.289	1.046.615	1.203.537	589.172
	TLEV 2000	547.071	1.069.223	781.867	412.309
Total Clean Vehicles		881.916	2.390.669	3.648.667	4.017.670
Total Vehicle Sales		5.963.042	5.906.471	5.792.093	5.828.178

Der Kraftstoffverbrauch nimmt mit dem zunehmenden Motorisierungsgrad im PKW-Verkehr leicht zu (Trend zum Zweitwagen) [METI 2004]. Die durchschnittlichen Fahrleistungen pro Jahr betragen dabei 10.000 Kilometer [VTT 2000a]. In Japan gibt es unter den umweltfreundlichen Fahrzeugklassen noch die sogenannten Kei-Cars oder Mini-Fahrzeuge mit knapp 30 Prozent Marktanteil. Da der Hersteller Toyota diese Klasse (nur) über die Tochterfirma Daihatsu anbietet und der in Kapitel fünf herangezogene Referenzbestand von Toyota daher keine Kei-Cars ausweist, wird die Klasse der Fahrzeuge unter 660ccm im folgenden nicht weiter betrachtet.

Die Konzentration an Feinstaub ist seit 1999 rückläufig. Dagegen steigen die anderen Schadstoffemissionen weiter an [Ohta 2004]. Der PKW-Sektor ist für 18 Prozent und der LKW-Sektor für 49 Prozent der gesamten japanischen Stickoxidemissionen im Jahr 2002 verantwortlich [Tokyo Metropolitan Government 2002a, S. 3ff.; JAMA 2005a, S. 66]. Der hohe Anteil des LKW-Sektors ist auf die starke Verbreitung von Dieselnutzfahrzeugen zurückzuführen. Inzwischen tauschen zwar viele Unternehmen, besonders kleine Frachtunternehmen, ihre Dieselfahrzeuge gegen Flüssiggas¹⁰ (Liquefied Petroleum Gas, LPG) und Erdgas (Compressed Natural Gas, CNG) betriebene Fahrzeugvarianten aus, aber die Erneuerung der gesamten Fahrzeugflotte ist sehr langwierig. Der Verkehrssektor (PKW- und LKW) hat einen Anteil von 21 Prozent an den gesamten japanischen Kohlendioxidemissionen im Jahr 2002 mit steigender Tendenz [Ohta 2004; VTT 2005; Koike 2005, S. 2; ACEA 2004c].

⁸ Datei [Fiscal 2003 Low Emission Vehicles Shipments](#)

⁹ Zur Erläuterung der LEV-Kategorien siehe Abschnitt 2.4 und 3.3.4.4

¹⁰ Autogas (siehe Abschnitt 2.3.8)

2.2.5 Zusammenfassung

Die verkehrsbedingten Emissionen vieler Luftschadstoffe haben in den letzten Jahren zum Teil deutlich abgenommen. Aufgrund dieser Rückgänge sind die Belastungen mit Kohlenmonoxid, Blei und Benzol weniger problematisch als noch vor einigen Jahren. Die Feinstaub-, Stickoxid- und Ozonimmissionen sind jedoch weiterhin Risikofaktoren für Herz- und Gefäß-, Atemwegs-, Krebs- und streßbedingte Erkrankungen – insbesondere in den Ballungszentren. Mit einem Anteil von zwanzig Prozent an den klimarelevanten CO₂-Emissionen trägt der Straßenverkehr wesentlich zum Treibhauseffekt bei. Auch für die zukünftige Entwicklung ist zu erwarten, daß ohne erhebliche Klimaschutzmaßnahmen die CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs weiter ansteigen werden. Die Entwicklung der Verkehrs- und Belastungssituation gilt sowohl für Deutschland als auch für Japan, wobei die Auswirkungen lokaler und kurzlebig wirkender Stoffe in ostasiatischen Metropolen ungleich höher einzuschätzen ist.

2.3 Technisch-ökonomische Rahmenbedingungen

Bis heute setzt sich der Fahrzeugbestand überwiegend aus Benzin- und Diesellaggregaten zusammen. Aggregate und Getriebe tragen fast dreißig Prozent zur Wertschöpfung eines Fahrzeugs bei. Der politische Entscheidungsträger benötigt zur Reduktion von Schadstoffen und zur Beurteilung des wirtschaftlicheren Ressourceneinsatzes Informationen über das Minderungspotential umweltfreundlicher Fahrzeugtechniken. Betrieblichen Planern eröffnen sich mit der Entwicklung neuer Fahrzeugkonzepte Marktchancen. Der Kunde handelt indes aus utilitaristischen Überlegungen, das heißt, er erhebt die Nützlichkeit zum Bewertungskriterium einer Kaufentscheidung und diese ist – abhängig vom jeweiligen Markt – nicht zwangsläufig ökologisch orientiert. Das muß der betriebliche Entscheidungsträger in seiner Planung berücksichtigen. Und auch die Politik ist gefordert, die Wettbewerbsfähigkeit sicherzustellen.

Abschnitt 2.3.1 erläutert technische Potentiale von Antriebsaggregaten zur Reduktion von Luftschadstoffen. Abschnitt 2.3.2 greift Möglichkeiten zur Kraftstoffverbrauchs- bzw. CO₂-Minderung auf. Daran anschließend sind in Abschnitt 2.3.3 alternative Kraftstoffe Gegenstand der Untersuchung. Abschnitt 2.3.5 geht auf die Marktpotentiale von Otto- und Dieselantrieben ein. Abschnitt 2.3.6 bewertet elektrische Antriebe. Daran anschließend erfolgt in Abschnitt 2.3.7 die Erläuterung von Hybridantrieben als Brückentechnologie zu Wasserstoff- und Brennstoffzellenbetrieb, auf die dann in Abschnitt 2.3.8 eingegangen wird. Erdgasantriebe sind schließlich Gegenstand der Betrachtungen in Abschnitt 2.3.9. Abschnitt 2.3.10 faßt die Ergebnisse zusammen.

2.3.1 Technische Potentiale zur Reduktion von Luftschadstoffen

Durch technische Fortschritte und Verbesserung der Kraftstoffqualität haben sich die spezifischen Emissionen von Kraftfahrzeugen stark vermindert. So sind die Bleimissionen mit Einführung von bleireduziertem und bleifreiem Benzin sowie die Schwefeldioxidemissionen aufgrund schwefelarmer Kraftstoffe stark zurückgegangen. Die Einführung des Dreiwegekataly-

sators und Optimierungen der Antriebstechnik vermindern die lokal wirksamen Emissionen des Individualverkehrs deutlich. Die Werte für NO_x und HC entsprechen noch einem Prozent der Emissionen von 1970. Dabei ist herauszustellen, daß auch Karosserien mit geringem Luftwiderstand, Antriebsstrangoptimierungen, Leichtbau sowie Leichtlaufreifen und Leichtlauföle einen Beitrag zur Umweltentlastung leisten. Abschnitt 2.3.1.1 erläutert die Funktionsweise von Otto- und Dieselmotoren. Davon ausgehend werden in Abschnitt 2.3.1.2 und Abschnitt 2.3.1.3 Möglichkeiten der innermotorischen Optimierung und der Nachbehandlung von Abgasen aufgezeigt.

2.3.1.1 Funktionsweise von Otto- und Dieselmotoren

Otto- und Dieselmotoren erzeugen ihre Leistung durch Wandlung der im Kraftstoff gebundenen chemischen Energie in Wärme (Verbrennung) und durch Umsetzung dieser Wärme in mechanische Arbeit (Übertragung auf ein Arbeitsmedium). Zur Verbrennung des überwiegend aus Kohlenwasserstoffen bestehenden Kraftstoffes wird Sauerstoff benötigt. Dieser wird normalerweise mit der Luft – bestehend aus 20 Prozent Sauerstoff und 80 Prozent Stickstoff – zugeführt, das heißt, es muß ein zündfähiges Gemisch aus gasförmigem Kraftstoffdampf und Luft hergestellt werden. Die aus der Verbrennung freiwerdende Energie erhitzt das Abgas – CO_2 und Sauerstoff – so sehr, daß sich eine *große Volumenänderung* desselben ergibt. Diese wirkt linear auf den beweglichen Kolben [Braess und Seiffert 2003, S. 150, 212; Bosch 2002, 406ff.]. Das wesentliche Unterscheidungsmerkmal ist beim derzeitigen Entwicklungsstand die Fremdzündung beim Ottomotor und die Selbstzündung beim Dieselmotor.¹¹ Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Regelung der Last.

Die Verbrennungsbedingungen in Otto- und Dieselmotoren lassen aufgrund des Funktionsprinzips und konstruktiver Merkmale keine schadstofffreie Verbrennung der Kraftstoffe zu. Die Abgase enthalten Produkte (CO , HC, NO_x und Partikel) aus unvollständiger Verbrennung in Folge hoher Verbrennungstemperaturen. Schadstoffarme Abgase sind nur in Kombination innermotorischer Maßnahmen mit Nachbehandlungssystemen zu erreichen [SRU 2005, S. 154ff.; Braess und Seiffert 2003, S. 150].

Die Abgase von Ottomotoren, die homogene Gemische verbrennen¹², enthalten vor allem CO , HC, und NO_x als Schadstoffe. Die Bildung dieser Schadstoffe hängt vom Luft-Kraftstoffverhältnis λ und der Verbrennungstemperatur ab. Bei Kraftstoffüberschuß, d.h. Luftmangel (fettes Gemisch mit $\lambda < 1$), entstehen vor allem CO und HC, bei hoher Temperatur mit ausreichendem Sauerstoffangebot ($\lambda \approx 1,1$) vorrangig NO_x -Emissionen. Bei mageren Gemischen ($\lambda > 1,2$) sinken die NO_x -Emissionen wieder, während der HC-Ausstoß ansteigt. Partikelemissionen entstehen bei unvollständiger Verbrennung für $\lambda < 0,6$. Motoren

¹¹ Spark Ignition, SI (Selbstzündung)

¹² Motoren mit konventioneller Saugrohreinspritzung bzw. Direkteinspritzer im Homogenbetrieb

mit Dreiwegekatalysator verfügen über λ -Regelung, welche die Kraftstoffmenge nach technischem Stand bemißt ($\lambda=1$) [SRU 2005, S. 154ff.; Merker und Stiesch 1999].

Dieselmotoren arbeiten dagegen mit Luftüberschuß $\lambda>1$ und *hohen Verbrennungstemperaturen*, die Abgase enthalten aus diesem Grund hohe NO_x -Mengen. Der Luftüberschuß nimmt mit steigender Last ab. Die Einspritzung des flüssigen und im Vergleich zum Benzinkraftstoff schlecht verdampfbaren Dieseldieselkraftstoffes führt zudem zu inhomogenen Verbrennungsbedingungen. In der Flamme tritt lokal Luftmangel auf, es kommt zur Rußpartikelbildung *bei unvollständiger Verbrennung*. Diese Tendenz zur Partikelbildung ist umso höher, je niedriger Luftüberschuß und Verbrennungstemperatur sind, das heißt je höher die Last oder aber die Abgasrückführungsrate ist. Die Abgasrückführung ist eine Technik, um innermotorisch die NO_x -Bildung zu reduzieren, da mit steigendem Abgasanteil in der Zuluft die Verbrennungstemperatur sinkt. Durch die entgegengesetzte Wirkung von Luftüberschuß und Verbrennungstemperatur auf Partikel bzw. NO_x -Emissionen besteht bei der innermotorischen Optimierung eine physikalische Konfliktsituation zwischen Partikel- und NO_x -Reduktion [Daisho 2003; S. 10; AT 2005; SRU 2005, S. 154ff.].¹³

Tabelle 2-3: Mittlere spezifische Schadstoffemissionen (g/km) der im Jahre 2002 zugelassenen PKW-Flotte differenziert nach Otto- und Diesel-PKW [UBA, schriftliche Mitteilung vom 17.09.2004 zitiert nach SRU 2005]

Schadstoff	CO	NM VOC	NO_x	Partikel	CO_2
Otto	3,5	0,26	0,36	0	197
Diesel	0,28	0,048	0,45	0,055	160
Flottendurchschnitt	2,9	0,21	0,38	0,012	189

Tabelle 2-3 gibt einen Überblick über die Emissionen der gesetzlich limitierten Luftschadstoffe und der CO_2 -Emissionen für die im Jahre 2002 zugelassene PKW-Flotte nach dem Stand der Technik. Besonders die Stickoxide und Partikelemissionen müssen weiter deutlich reduziert werden, um die strengen Abgasstandards der USA, Europas und Japans zu erfüllen [Zintz 2005; Markus 2004]. Im folgenden werden die Unterschiede integrierter (vorsorgender) und additiver (nachsorgender) Technologien erläutert.

2.3.1.2 Innermotorische Optimierung

Ziel der innermotorischen Optimierung beim Dieselmotor ist die weitere Reduzierung der Schadstoffemissionen. Die Weiterentwicklungen des Ottomotors konzentrieren sich eher auf Verbrauchssenkungen.

Dieselfahrzeuge sind zwar verbrauchsärmer als Ottofahrzeuge, stoßen aber je nach zugrundegelegtem Fahrzyklus und ohne Minderungsmaßnahmen wesentlich mehr Stickoxide und Partikel aus [UBA 2003f; Daisho 2003, S. 9]. Der Grund liegt zum einen in der inhomogenen Verbrennung, zum anderen ist die Abgasnachbehandlung mit Dreiwegekatalysator wegen der

¹³ Der bei Ottomotoren zum Einsatz kommende Dreiwegekatalysator steht für Dieselantriebe nicht zur Verfügung, sodaß die Hersteller an anderen technischen Lösungen arbeiten [AT 2005; Bosch 2002, S. 603].

fehlenden Möglichkeit zur λ -Regelung nicht möglich. Die erweiterte Abgasrückführung ist innermotorisch die Technik, um durch Absenken der Verbrennungstemperatur und durch Optimierung vieler Teilkomponenten die Stickoxidbildung zu vermindern. Das Ziel ist auch beim Diesel die homogene Verbrennung. Bei der Homogenisierung geht es darum, die Verbrennung in Bereiche zu schieben, in denen das Luft-Kraftstoffverhältnis ausreichend groß ist, um Ruß zu verhindern und gleichzeitig die lokale Verbrennungstemperatur ausreichend niedrig zu halten, damit kein NO_x entsteht. Eine weitere innermotorische Maßnahme ist die elektronisch gesteuerte Hochdruckeinspritzung. Die Absenkung der Verbrennungstemperatur zur innermotorischen NO_x -Minderung erhöht neben den Partikel- und HC-Emissionen auch den Kraftstoffverbrauch. Dieser Zielkonflikt zwischen Verbrauch und Partikelemissionen gegenüber NO_x -Emissionen kann nur durch Abgasnachbehandlung gelöst werden [SRU 2005, S. 155f.; Hadler 2005].

Der Schwerpunkt der innermotorischen Optimierung beim Ottomotor liegt in der Effizienzsteigerung im Teillastbetrieb, das heißt in einer Verringerung der Drosselverluste. Direkteinspritzung, Verbrennung mit Luftüberschuß (Schichtladebetrieb) und die variable Ventilsteuerung sind geeignete Techniken dafür. Beim Schichtladebetrieb ($\lambda > 1$) kann die Schadstoffreduktion nicht mehr mit einem Dreiwegekatalysator erfolgen. Die Abgasrückführung im Teillastbereich ist für solche Motoren eine Lösung zur Stickoxidreduktion. Der Kraftstoffverbrauch erhöht sich dabei jedoch [Merker und Stiesch 1999; Daisho 2003, S. 10].

2.3.1.3 Abgasnachbehandlungssysteme

Innermotorische Maßnahmen werden um Abgasnachbehandlungssysteme ergänzt. Bei heutigen Ottomotoren (mit Ausnahme der direkteinspritzenden Ottomotoren ohne Homogenbetrieb) ist der Dreiwegekatalysator mit Lambda-Regelung im Moment die leistungsfähigste Technologie zur Schadstoffminderung. Voraussetzung für eine effektive Abgasreinigung ist ein exaktes stöchiometrisches Luft-Kraftstoffverhältnis ($\lambda = 1$) mittels einer elektronischen Regelung (λ -Sonde). Ansonsten werden entweder die CO- und HC- oder die NO_x -Emissionen nicht mehr effektiv reduziert [SRU 2005, S. 155f.].

Die Ende der 80-er Jahre entwickelten Oxidationskatalysatoren ergeben für Dieselfahrzeuge Freiheitsgrade in der Reduzierung der Abgaskomponenten, mit denen HC und CO um etwa 90 Prozent reduziert werden können [AT 2005]. Der Oxidationskatalysator ist Teil der Strategie, durch Abgasrückführung innermotorisch die NO_x -Bildung zu kontrollieren und durch die Nachbehandlung die Produkte der unvollständigen Verbrennung zu reduzieren. Zur Verringerung der Rußpartikel und der NO_x -Emissionen kann der Oxidationskatalysator selbst nicht beitragen [SRU 2005, S. 155f.; Hadler 2005].

Als elektronische Regelung für Dieselmotoren oder Motoren, die nicht im Homogenbetrieb $\lambda = 1$ (hoher Luftüberschuß) arbeiten, bietet sich zur Stickoxidreduktion der NO_x -Speicher-Reduktionskatalysator an. Speicherkatalysatoren oxidieren im normalen mageren Betriebszu-

stand ($\lambda > 1$) das NO und absorbieren es in Form von Nitrat. In bestimmten Intervallen muß eine kurzzeitige Anfettung ($\lambda < 1$) im Motor erfolgen, damit das gespeicherte Nitrat reduziert und der Katalysator regeneriert wird. Die Regelung dieses Prozesses erfolgt mittels eines NO_x-Sensors. Die erreichbare NO_x-Reduzierung liegt bei bis zu 90 Prozent bei gering erhöhtem Kraftstoffverbrauch [UBA 2003f]. Voraussetzung für den Betrieb des NO_x-Speicher-Reduktionskatalysators ist ein schwefelfreier Kraftstoff, da Schwefel die Funktionsdauer des Katalysators senkt und die Regenerationszyklen verkürzt [Hadler 2005; SRU 2005, S. 155f.]. Schwefelfreie Kraftstoffe sind in Deutschland seit 2003 eingeführt und müssen in der gesamten EU ab 2005 verfügbar gemacht werden. In Japan dagegen sind schwefelarme Kraftstoffe noch nicht so verbreitet [VTT MTN 2003d; VTT MTN 2002c; Daisho 2003, S. 10].

Ein alternatives Verfahren, das ohne die beim Dieselmotor problematische Anfettung des Gemisches zur Regeneration des Katalysators auskommt, ist die Selektive Katalytische Reduktion (SCR). Bei diesem Verfahren wird ein Reduktionsmittel (wäßrige Harnstofflösung¹⁴) zugeführt, mit dem die Stickoxide zu Stickstoff und Wasser reagieren. Nach derzeitigem Stand der Technik ist die Zugabe von Harnstoff die einzige Lösung, NO_x-Ausstoß und Kraftstoffverbrauch gleichzeitig zu mindern [ACEA 2003a; Daisho 2003, S. 10]. Ein Nachteil dieser Technik ist die notwendige Zufuhr des Reduktionsmittels, das in einem abgesonderten Tank mitgeführt werden muß. Zudem ist der schrittweise Aufbau einer Infrastruktur erforderlich. Schließlich ist die Verwendung schwefelfreier Kraftstoffe auch für den Einsatz von SCR-Katalysatoren notwendig [SRU 2005, S. 156; UBA 2003c].

Die Partikelemissionen von Dieselfahrzeugen lassen sich mit modernen Rußfiltern effektiv vermindern. In den Keramikfiltern werden Feinstäube zunächst gespeichert und dann in regelmäßigen Abständen, nach ungefähr 800 bis 1000 Kilometern, bei etwa 500°C verbrannt (Regeneration). Dies kann entweder durch Zufuhr eines Additivs geschehen, das die Abbrenntemperatur der Partikel senkt, oder durch Temperaturerhöhung des Abgases über eine gezielte Kraftstoffnacheinspritzung. Der durch die Regenerationsphase bedingte Mehrverbrauch ist über die gesamte Kilometerleistung gering [Gauß 2001; Daisho 2003, S. 10].

Mit innermotorischen Maßnahmen allein können die Partikelemissionen von Dieselfahrzeugen nur um weitere 30 bis 40 Prozent, die NO_x-Emissionen nur um 20 bis 30 Prozent gemindert werden. Abgasnachbehandlungssysteme können dagegen die Schadstoffemissionen drastisch senken und auf den Stand moderner Ottomotoren bringen (NO_x-Minderung 70 Prozent, Partikelminderung 90 Prozent). Die laufenden und durchaus überzeugenden Verbesserungen der konventionellen Otto- und Dieselmotoren haben die Notwendigkeit einer zukunftsweisen Innovation in neue Antriebstechniken (z.B. Hybridkonzepte mit dem Fokus auf elektrischer Traktion) immer wieder überlagert. Seit einiger Zeit ist jedoch ein abnehmender Grenz-

¹⁴ Bezeichnung: AdBlue

ertrag aus den Fortentwicklungen der vorgenannten Motoren erkennbar, so daß parallel dazu alternative Antriebskonzepte entwickelt werden mußten [SRU 2005, S. 157; Schäfer 2004].

2.3.2 Technische Potentiale zur Kraftstoffverbrauchs- und CO₂-Minderung

Um langfristige Klimaschutzvorgaben zu erreichen, muß der Individualverkehr neben den Partikel- und NO_x-Emissionen zu einer Minderung des CO₂-Ausstoßes beitragen. Der Kohlendioxidausstoß ist dabei direkt an den Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs gekoppelt. Die Reduzierung von CO₂ kann daher zweifach erfolgen:

- Minderung des Kraftstoffverbrauches bei Fahrzeugen mit konventionellen Verbrennungsmotoren
- Verwendung effizienterer Kraftstoffe mit verringertem (spezifischem) CO₂-Ausstoß

Der Kraftstoffverbrauch von herkömmlichen Verbrennungsmotoren ist über eine Optimierung der Motorentechnologie, das Betreiben des Motors im effizienten Kennfeldbereich und ein optimiertes Energiemanagement zu erreichen. Zusätzliche Maßnahmen wie Leichtbau und Verminderung von Roll- und Luftwiderstand sowie verändertes Fahrverhalten werden im folgenden nicht weiter untersucht [SRU 2005, S. 163; Automobilproduktion 2006, S. 18ff.].

2.3.2.1 Verbesserung der Motorentechnologie

Beim herkömmlichen Benzinmotor (Saugrohreinjection, Vergaser) werden Ottokraftstoff und Luft außerhalb des Brennraums gemischt. Verluste entstehen hier bei der Lastregelung mittels Drosselklappe, die den Kraftstoffverbrauch insbesondere im Teillastbereich erhöht. Durch Direkteinspritzung und einen variablen Ventilbetrieb ergeben sich deutliche Verbrauchsminderungen. Direkteinspritzende Ottomotoren emittieren jedoch mehr NO_x und Partikel und erfordern eine entsprechende Abgasnachbehandlung [SRU 2005, S. 163]. Dieselmotoren verbrauchen im Vergleich zu Ottomotoren um 15 bis 20 Prozent weniger Kraftstoff. Aufgrund der Direkteinspritzung und trotz Verbrennung mit Luftüberschuß kann es lokal sowohl zu Luftmangel als auch zu hohen Temperaturen kommen, die Rußpartikel und Stickoxide entstehen lassen. Hier entsteht, wie bereits unter Abschnitt 2.3.2 erläutert, eine physikalische Konfliktsituation mit den Bemühungen um eine gleichzeitige CO₂ und NO_x-Reduktion. Stickoxide entstehen unter anderem bei hohen Brennraumtemperaturen. Je höher der Wirkungsgrad¹⁵ mit steigender Verbrennungstemperatur, desto mehr NO_x bildet sich. Die Weiterentwicklung von Dieselmotoren konzentriert sich daher auf eine homogenere Gemischbildung und Schadstoffreduktionen mittels optimaler Einspritzverfahren [Thiele und Merker 2004; Daisho 2003, S. 9]. Weitere Zielkonflikte treten beispielsweise zwischen gesetzlichen Sicherheitsanforderungen und Kraftstoffverbrauch sowie zwischen höherem Fahrzeuggewicht der nachgefragten Fahrzeugkonzepte und Kraftstoffverbrauch auf [Lenz und

¹⁵ Wirkungsgrad: Mehr Nutzleistung aus einer gegebenen Kraftstoffmenge.

Cozzarini 1998, S. 33]. Otto- und Dieseltechnologie gleichen sich in ihren Brennverfahren langfristig an [Automobilproduktion 2006, S. 24f.; Steiger et al. 2003; Sherman 2004].

2.3.2.2 Hubraumverkleinerung und Verbesserung der Getriebe

Verbrennungsmotoren besitzen den besten Wirkungsgrad in einem begrenzten Betriebsbereich. Diesen Kennfeldbereich möglichst wenig zu verlassen, ist das Ziel des sogenannten ‚Downsizing‘ (Hubraumverkleinerung) und verbesserter Getriebe. Der Wirkungsgrad ist gut, wenn die Brennkraftmaschine mit hoher Zylinderfüllung arbeitet, also ihr Hubraumvolumen ausnutzt. Ein nicht aufgeladener Motor¹⁶, der für eine Höchstleistung von 60kW bei 6000 Umdrehungen (U) pro Minute (min) ausgelegt ist, arbeitet daher mit gutem Wirkungsgrad, wenn er bei 1000U/min etwa 10kW oder bei 2000U/min etwa 20kW abgibt. Das Verhältnis von nutzbar abgegebener zur aufgewandten Energie beziehungsweise Leistung, also der Wirkungsgrad, wird schlechter, je weniger Leistung die Brennkraftmaschine, gemessen an ihrer Höchstleistung bei der jeweiligen Drehzahl, abgibt. Die Verschlechterung des Wirkungsgrades ist bei Ottomotoren ausgeprägter als bei Dieselmotoren¹⁷. Im Teillastbetrieb, in dem in der Praxis am meisten gefahren wird und in dem wenig Vortriebsleistungen benötigt werden, ist der Wirkungsgrad am schlechtesten. Diese Verschlechterung ist ausgeprägter, je größer der Hubraum ist. Entsprechend sind Motoren mit kleinem Hubraum beim Fahren mit niedrigen Drehzahlen im Stadtverkehr deutlich sparsamer als hubraumstarke Motoren. Eine Maßnahme, dem Verbrauchsanstieg mit abnehmender Last entgegenzuwirken, ist die elektrisch unterstützte Aufladung. Das ist auch das Leitmotiv beim hybriden Antrieb aus Verbrennungsmotor und elektrischer Batterie (siehe Abschnitt 2.3.6) [Barske 2004, Braess und Seiffert 2003, S. 129]. Automatisierte Schaltgetriebe mit großer Getriebespreizung (6 bis 7 Gänge) und als Weiterentwicklung stufenlose Getriebe können den Verbrauch mit elektronischer und hydraulischer Unterstützung weiter senken [Hofmann et. al 2003].

2.3.3 Alternative Kraftstoffe zur Minderung von Luftschadstoffen und CO₂

Die aktuelle Entwicklung im Kraftstoffsektor ist geprägt von der Umsetzung der EU-Richtlinie 2003/30/EG zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen und anderen emissionsenkenden Kraftstoffen. Als Folge ist eine Produktionssteigerung der Biokraftstoffe mit bereits ausgereifter Technologie (Biodiesel, Bioethanol) zu beobachten. Gleichzeitig ist die Entwicklung neuer Technologien im Kraftstoffbereich zu erkennen [SRU 2005, S.196]. Bis

¹⁶ Durch Aufladung wird mehr Luft und damit mehr Sauerstoff in die Zylinder gepumpt und dadurch die Füllung verbessert. Die Motorleistung steigt ohne Hubraumerhöhung, beim Dieselmotor besonders das Drehmoment im unteren Drehzahlbereich.

¹⁷ Der maximale Wirkungsgrad von Dieselmotoren liegt bei über 40 Prozent. Der mittlere Gesamtwirkungsgrad über einen typischen Fahrzyklus von der Gewinnung der Primärenergie über die Umwandlung bis zur Übertragung auf das Rad beträgt jedoch nicht mehr als 20 Prozent.

2020 sollen daher in der Europäischen Union 20 Prozent der rohölbasierten Kraftstoffe durch Alternativen ersetzt worden sein.

2.3.3.1 Überblick

NO_x-Speicherkatalysatoren benötigen einen geringeren Schwefelgehalt in den Kraftstoffen (<10ppm). Probleme bereiten diese Kraftstoffe jedoch an den Einspritzaggregaten und bei verbotenen Elastomeren, was die Zugabe von Additiven notwendig macht [Bosch 2002, S. 598]. Schwefeldfreie Kraftstoffe reduzieren gleichzeitig auch HC, CO und Staubpartikel sowie (indirekt) auch die CO₂-Emissionen, da bei Dieselfahrzeugen mit Partikelfilter die Intervalle zwischen den Regenerationen verlängert und der Kraftstoffverbrauch gemindert werden.

Synthetische Rohstoffe lassen sich in besserer Qualität herstellen als Kraftstoffe aus Rohöl, verbessern den innermotorischen Verbrennungsprozeß und reduzieren die Rohemissionen der *gesamten* Fahrzeugflotte weiter. Auch Erdgas als Kraftstoff für Fahrzeuge mit Ottomotor bietet weiteres Potential zur Emissionsreduktion (siehe Abschnitt 2.3.8). Erdgas ist indes auch ein möglicher Ausgangsstoff zur Herstellung flüssiger (synthetischer) Kraftstoffe, so daß die Verwendung von Erdgas als direkter Kraftstoff eher als ‚Übergangstechnologie‘ einzuordnen ist [Behlmer und Wanke 2003, S: 13f.].

2.3.3.2 Synthetische Kraftstoffe aus Erdgas (Gas-to-Liquid)

Grundsätzlich lassen sich synthetisch hergestellte Kraftstoffe, welche auch als „Designerkraftstoffe“ bezeichnet werden, in zwei Varianten unterscheiden. Bei beiden wird durch die Fischer-Tropsch-Synthese ein Synthesegas in flüssige Kraftstoffe umgewandelt. Die so erzeugten Kraftstoffe sind vollständig frei von Schwefel und aromatischen Kohlenwasserstoffen. Sie können optimal an die Motorenanforderungen angepaßt werden, da sie sich nur aus rund 100 Substanzen zusammensetzen, im Gegensatz zu den ungefähr 3000 Substanzen bei Kraftstoffen aus Mineralöl. Schließlich ist die bestehende Tankstelleninfrastruktur nutzbar.

Die erste Variante synthetischer Kraftstoffe wird aus Erdgas hergestellt. Als Synthesegas ist es der Ausgangsstoff für die Fischer-Tropsch-Synthese, durch die flüssiger Kraftstoff gewonnen wird. Diese so hergestellten Kraftstoffe werden als ‚Gas-to-Liquid‘-Kraftstoffe bezeichnet (GTL). Die Kraftstoffe sind auch unter der Bezeichnung ‚Synfuel‘ bekannt. Sie werden heute bereits zu einem Teil den herkömmlichen Ottokraftstoffen beigemischt und mit ihrer leistungssteigernden Wirkung beworben. Ein auf diese Weise hergestellter synthetischer Dieselmotorkraftstoff hätte eine deutlich höhere Cetanzahl von 80 gegenüber 53 herkömmlichen Diesels, was eine Ausweitung der Abgasrückführung ermöglicht und eine weitere Reduktion von Partikel- und NO_x-Emissionen zur Folge hat. Nach Angaben von Shell-Forschern betragen die Herstellungskosten etwa 20 US-Dollar pro Barrel GTL (159 Liter), was sicherlich großzügig gerechnet ist. Mit der Herstellung von GTL in großem Umfang kann so erheblicher Druck auf die Erdölpreise ausgeübt werden, um sie weitgehend stabil zu halten [Bartsch 2004].

Da bei der Fischer-Tropsch-Synthese das H_2 / CO -Verhältnis gezielt eingestellt werden kann, ist eine exakte Beeinflussung der Kraftstoffeigenschaften möglich. Es kann sowohl Ottokraftstoff, als auch Diesellokraftstoff oder Kerosin hergestellt werden. Durch diese Möglichkeit der optimalen Anpassung von synthetischen Kraftstoffen an die jeweiligen Anforderungen der Motoren können – durch Verbesserung des Verbrennungsprozesses – die Kohlenwasserstoffemissionen um 63 Prozent und die Kohlenstoffemissionen um 91 Prozent gegenüber Diesel und Benzin aus Mineralöl reduziert werden. Die mögliche Reduktion der CO_2 -Emissionen beträgt 4 Prozent [AutoEntw 2004, S.17].

2.3.3.3 Synthetische Kraftstoffe aus Biomasse (Biomass-to-Liquid)

Bei der zweiten Variante der Herstellung synthetischer Kraftstoffe wird das Synthesegas aus Biomasse erzeugt. Diese Verfahren werden als ‚Biomass-to-Liquid‘-Verfahren (BTL) bezeichnet. Je nach Hersteller tragen die so erzeugten Kraftstoffe die Bezeichnungen ‚Sundiesel‘, ‚Biotrol‘ oder ‚Sunfuel‘. Die Einführung solcher aus regenerativen Quellen erzeugten Kraftstoffe ermöglicht eine dauerhaft tragfähige und CO_2 -neutrale Kraftstoffversorgung [VDI 2003, S.439ff].

Als Ausgangsmaterial sind Holz, Stroh, Getreide oder Ölpflanzen geeignet. Die verwertbare Biomasse ist somit nicht auf öl- oder zucker- und stärkehaltige Pflanzenteile beschränkt [SRU 2005, S.181]. Zur Gewinnung von Kraftstoffen aus Biomasse überführt man diese zunächst durch Vergasung in ein wasserstoff- und kohlenmonoxidreiches Synthesegas, welches nach einer Gasreinigung mit der Fischer-Tropsch-Synthese in Kohlenwasserstoffe umgesetzt wird. Nach der Abtrennung von Stäuben, Teeren und Wasser werden die noch im Synthesegas verbliebenen Störkomponenten durch Adsorption beziehungsweise Absorption entfernt. Das H_2 / CO -Verhältnis kann vor der anschließenden Fischer-Tropsch-Synthese wieder über die Wassergaskonvertierung eingestellt werden. Bei der Fischer-Tropsch-Synthese überführt man das Synthesegas an Kobalt- und Eisen-Katalysatoren in paraffinische Kohlenwasserstoffe. Hierbei werden benzin- oder dieselartige Kohlenwasserstoffe gebildet, wenn ein Niedertemperaturverfahren angewendet wird. Bei Hochtemperaturverfahren an Fe-Katalysatoren werden mehr niedermolekulare Verbindungen erzeugt, welche für Kraftstoffe jedoch eher unerwünscht sind [VDI 2003, S. 443]. Für die Verbrennung in einem Motor wird das Endprodukt dann durch mildes Hydrocracken in Benzin-, Kerosin- und Dieselfractionen aufgetrennt.

In Deutschland können bis zu 6 Prozent des Primärenergiebedarfs aus einheimischer Biomasse gedeckt werden, rund die Hälfte hiervon allein aus Rückstands- und Abfall-Biomasse. Diese breite Rohstoffgrundlage ist gleichbedeutend damit, daß ein Fünftel des derzeitigen Dieselverbrauchs in Deutschland substituiert werden könnte, wenn ausreichend Produktionskapazitäten vorhanden wären [VDI 2003, S. 443]. Derzeit beträgt der Gesamtverbrauch in Deutschland 29 Millionen Tonnen Diesel und 28 Millionen Tonnen Benzin. Im Jahr 2009 sollen eine Million Tonnen an synthetischen Biokraftstoffen verfügbar sein.

Die Produktionskosten für die großtechnische Erzeugung von BTL-Kraftstoffen werden mit etwa 60 Cent pro Liter angesetzt. Die Kosten für die eingesetzte Biomasse bilden dabei ein Drittel der Produktionskosten. In 15 bis 20 Jahren könnten die Produktionskosten durch einen effizienteren landwirtschaftlichen Anbau und verbesserte Verfahren zur Synthese Produktionskosten auf etwa 40 Cent pro Liter gesenkt werden. Unter Berücksichtigung der zu erwartenden Preissteigerungen der fossilen Kraftstoffe könnte dann eine Kostengleichheit erreicht werden [SRU 2005, S.184].

2.3.3.4 Biodiesel

Biodiesel (Rapsölmethylester, RME) und Ethanol sind Fettsäuremethylester, welche mit Methanol aus umgeesterten pflanzlichen Ölen und Fetten erzeugt werden (siehe auch Abschnitt 2.3.4.5) [Bosch 2002, S. 283]. Schwefelarmer Biodiesel als möglicher alternativer Kraftstoff für Dieselfahrzeuge wird aus Raps gewonnen, ist technisch ausgereift und in Deutschland seit 1994 verfügbar. Neben Raps können auch Sojabohnen und Sonnenblumen als Ausgangsmaterial verwendet werden. Von 25.000 Tonnen Kraftstoff im Jahr 1994 hat sich die Produktionsmenge in Deutschland im Jahr 2004 auf 1,2 Millionen Tonnen vervielfacht [Heitmann 2005]. Im Jahre 2003 deckte Biodiesel 0,9 Prozent des Energieverbrauchs im Straßenverkehr ab. Derzeit liegt der Anteil am Dieselmotor bei etwa 5 Prozent [SRU 2005, S.181; FNR 2007].

Zur Biodieselherstellung wird zwar verstärkt Raps auf Stilllegungsflächen angebaut, die nicht mehr zur Lebensmittelproduktion bewirtschaftet werden dürfen. Trotzdem ist die Bindung von Agrarflächen ein Nachteil des Rapsanbaus. Die Kraftstoffeigenschaften führen zu Problemen, da mangels einheitlicher europäischer Standards die Kraftstoffqualität starken Schwankungen unterliegt. So kann es zu Schlamm- und Wasserbildung kommen oder eine verstärkte Wasseraufnahme eintreten, was für die Einspritzanlagen moderner Dieselfahrzeuge äußerst schädlich ist [Behlmer und Wanke 2003, S.13]. Eine Strategie, diese Probleme des reinen Biodiesels zu reduzieren, ist die Beimischung von bis zu 5 Prozent (B5) zum normalen Dieselmotor aus Mineralöl [SRU 2005, S.181]. Der Betrieb eines Dieselfahrzeuges mit Biodiesel bringt jedoch noch weitere Nachteile mit sich. Bei der Verbrennung von Biodiesel fallen höhere NO_x -Emissionen an und von einigen Herstellern ist der Einsatz von Biodiesel in Fahrzeugen mit Partikelfiltern aufgrund der erhöhten Gefahr eines Motorschadens nicht freigegeben. Aufgrund geringeren Heizwertes – ein Liter Biodiesel ersetzt 0,91 Liter Diesel – erhöht sich auch der Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeuges [Hack 2005, FNR 2007, Choren 2007]. Trotzdem reduzieren sich (zunächst) die CO_2 -Emissionen, da ja regenerative Biomasse verbrannt wird, es müssen bei der Betrachtung der gesamten Emissionsbilanz jedoch auch die durch den zusätzlichen Anbau von Raps anfallenden Emissionen berücksichtigt werden. Aufgrund des geringeren Nutzungsgrades der Biomasse im Vergleich zu BTL-Kraftstoffen fallen diese bei Biodiesel deutlich höher aus. Teilweise fällt die Energiebilanz sogar negativ aus, da

zur Erzeugung der Ausgangspflanze mehr Energie investiert werden muß, als aus dem erzeugten Kraftstoff gewonnen werden kann [Pimentel 2005]. Die Nutzung von Biodiesel hat somit gegenüber dem Einsatz von fossilem Dieselmotorkraftstoff ökologische Vor- und Nachteile. Sein Einsatz ist vorteilhaft hinsichtlich der Einsparung fossiler Energiequellen, der Reduktion der Treibhausgase, Verminderung von Partikelemissionen und nachteilig bezüglich der Versauerung des Bodens, des Nährstoffeintrags und des Ozonabbaus [IFEU 2003, S. 7].

Die Produktionskosten für Biodiesel betragen heute rund 50 Cent pro Liter. Das Umweltbundesamt erwartet, daß Biodiesel auch langfristig ohne Förderung nicht wettbewerbsfähig sein wird, da das Wettbewerbsdefizit struktureller Natur ist. Die Preise der Kuppelprodukte Rapschrot und Glycerin haben erheblichen Einfluß auf die Herstellungskosten. Dies ist bei der Produktionsausweitung und der damit verbundenen Unsicherheit über die Vermarktbarkeit der großen Mengen zu berücksichtigen [SRU 2005, S.184]. Schließlich steigt die Steuer für Biodiesel und Pflanzenöl bis 2012 auf den vollen Dieselsatz an, so daß sich die beiden alternativen Kraftstoffe immer weniger lohnen.

Es ist daher äußerst fraglich, ob sich Biodiesel langfristig etablieren kann oder nur ein Nischenprodukt für einen gewissen Übergangszeitraum darstellt. Daher wird im Rahmen der weiteren Betrachtungen Biodiesel als Kraftstoffalternative nicht explizit berücksichtigt. Die eingesetzten minimalen Anteile dieses Kraftstoffes gehen im Modell als Teil der Kraftstoffe aus Biomasse auf, da sie voraussichtlich durch die effektiveren BTL Kraftstoffe ersetzt werden – sobald diese verfügbar sind.

2.3.3.5 Methanol- und Ethanolbetrieb

Die begrenzte Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe fördert verstärkt Entwicklungen von Ottomotoren und Einspritzsystemen für marktfähige Alkohole wie Methanol (CH_3OH) und Ethanol ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$) als alternative Kraftstoffe. Dabei wird Ethanol eine höhere Leistungsfähigkeit zugeschrieben als Methanol [Wandtner 2005].

Ethanol wird aus zuckerhaltigen Pflanzen gewonnen und in Ländern mit einer landwirtschaftlichen Überproduktion (z.B. Brasilien) seit den 70er Jahren staatlich gefördert und großtechnisch genutzt. Dabei kommen auch Reststoffe und Abfälle zum Einsatz [Bosch 2002, S.282f.; Braess und Seiffert 2005, S.329]. Länder mit wenig Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe, wie zum Beispiel Japan mit seiner besonderen Geographie (siehe 2.2.4.2), sind wegen der Bindung von Agrarflächen auf Importe angewiesen [DY 2003a; VTT 2005]. Der zunehmend in den USA und speziell in Kalifornien geforderte Methanolbetrieb mindert den NO_x - und CO_2 -Ausstoß und verringert die Ozon- und Smogbildung. Darüber hinaus läßt sich Methanol relativ einfach aus Synthesegas oder Erdgas herstellen. Weiterhin kann Methanol als chemischer Träger von Wasserstoff in Brennstoffzellen zum Einsatz kommen (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC) [AGQM 2005; Aral 2005b; Shell 2005; Braess und Seiffert 2003, S. 329].

Methanol erfüllt zwar viele Forderungen an einen geeigneten Kraftstoff (geringer Dampfdruck, relativ hoher Heizwert, hohe Dichte). Heizwert und Dichte entsprechen indes lediglich 48 Prozent der Speicherdichte von Benzin, wodurch sich die Reichweite bei gleichem Tankinhalt reduziert. Ein weiterer Nachteil von Methanol ist zudem die hohe Toxizität. Heizwert und Dichte von Ethanol entsprechen 65 Prozent der Speicherdichte von Benzin. Bei gleichem Tankvolumen ist die Reichweite also etwas höher als bei Methanol [Schindler 1997, S. 84ff.].

Da eine lückenlose Tankstelleninfrastruktur mit Methanol- und Ethanolkraftstoffen hohe Kosten verursacht, müssen die Motoren und Motorsteuerungssysteme für einen flexiblen Mischbetrieb (von Rein-Benzin bis zur unterschiedlichen Beimischung von Methanol bzw. Ethanol¹⁸) ausgelegt werden. Mischungen bei Ethanol sind zum Beispiel E2, E85 oder E100, wobei die dem E angefügte Zahl angibt, wieviel Volumenprozent Ethanol dem Benzin beigegeben wurden. Alkohol stellt an Motoren und Kraftstoff führende Bauteile spezielle, besonders kritische Anforderungen, denn zum Teil gefährden die Kraftstoffe die metallischen Werkstoffe, Kunststoffe sowie Gummi. Alkohole können auch in Dieselmotoren zum Einsatz kommen. Hierbei muß die geringe Cetanzahl als Maßzahl für die Zündwilligkeit des Dieselmotorkraftstoffes durch spezielle Maßnahmen ausgeglichen werden, z.B. durch Beimischung von Zündbeschleunigern [Schindler 1997, S. 84ff.; Bosch 2002, S. 282; VTT 2005].

Je nach Ausgangspflanze müssen bei der Produktion von Ethanol 29 bis 57 Prozent mehr Energie (und Wasser) aufgewendet werden, als aus dem Kraftstoff gewonnen werden kann. Die Produktionskosten betragen im günstigsten Fall 45 bis 55 Cent pro Liter Benzinäquivalent. Auch 80 bis 90 Cent pro Liter gelten als nicht unwahrscheinlich [Pimentel 2005; SRU 2005, S.184; DY 2003a]. Der Wirkungsgrad der Methanolerzeugung aus Kohle beträgt lediglich 50 Prozent und die Erzeugung durch Synthesegas aus Biomasse oder Erdgas bei etwa 66 Prozent. Hierbei wird deutlich, daß der direkte Einsatz dieser Gase die sinnvollere Alternative darstellt [Braess und Seiffert 2005, S.329]. Aufgrund dieser gravierenden Nachteile wird auf eine weitere Berücksichtigung von Ethanol und Methanol als alternativer Kraftstoff verzichtet. Stattdessen werden Erdgas und Synthesegas aus Biomasse als direkter Kraftstoff eingesetzt.

2.3.4 Marktpotential von Otto- und Dieselantrieben

Bei europäischen Fahrbedingungen aus konstanter Langstreckenfahrt, Überland- und Stadtverkehr hat sich der verbrauchsarme Dieselantrieb mit einem Marktanteil von rund 21 Prozent etabliert (Ottomotoren: rund 78 Prozent) [Albrecht 2005, Hadler 2005]. Die Diskussion um Gesundheitsschäden durch Rußpartikel hat die Nachfrage dabei nur wenig beeinträchtigt. Der Marktanteil bei den Neuzulassungen in Europa liegt in 2004 bei 43,6 Prozent und im Jahr 2005 sind erstmals mehr als die Hälfte der neuzugelassenen PKW in Westeuropa mit einem

¹⁸ Bereits ab 5 Prozent Beimischung treten Probleme mit den lokalen Schadstoffen auf, wodurch sich der Vorteil der CO₂-Reduktion bezogen auf die gesamte Produktionskette revidiert [Behlmer und Wanke 2003, S. 13].

Dieselmotor ausgestattet [Polk Marketing Systems 2005; AT 2005; GAIM 2003]. Neben dem geringeren Kraftstoffverbrauch eines Dieselmotors im Vergleich zu einem entsprechenden Ottomotor ergibt sich die Kostenersparnis in Deutschland auch aus dem steuerpolitisch bedingten Kostenvorteil des Dieselmotors gegenüber Benzin. Im Falle einer umweltpolitischen Gleichbehandlung von Diesel- und Ottoantrieben, schärferen Partikelgrenzwerten ab 2010 und Innenstadtsperren (z.B. London, Tokio, Stockholm) sind die gesetzlichen Hürden jedoch nur mit einer doppelten Abgasnachbehandlung zu erreichen: einem Katalysator zur Stickoxidreduktion und einem Filter zur Bekämpfung von Rußpartikeln. Damit steigen auch die Kosten des Selbstzünders im Vergleich zum Benzinantrieb. Dieselfahrzeuge sind vom Grundbau und der Einspritztechnik in der Herstellung ohnehin teurer als Benzinfahrzeuge, die Hersteller bieten sie aber nur knapp über dem Preisniveau des Ottomotors an. Zudem gleichen sich Verbrauchsvorteile von Benzin- und Dieselfahrzeugen durch Weiterentwicklungen beim Benzinantrieb (z.B. Verfeinerung der Ventilsteuerung, Benzin-Direkteinspritzung) an. Gleichwohl profitiert der kraftstoffeffiziente Diesel durch eine mögliche Änderung der Kfz-Steuer zu einer verbrauchsorientierten Steuer (siehe Abschnitt 2.4 und Kapitel 3). Nach Prognosen von Polk Marketing Systems erreicht der Dieselanteil in Europa 2009 mit knapp 60 Prozent seinen Höhepunkt (siehe Abbildung 2-4). [Polk Marketing Systems 2005; Köhn 2004].

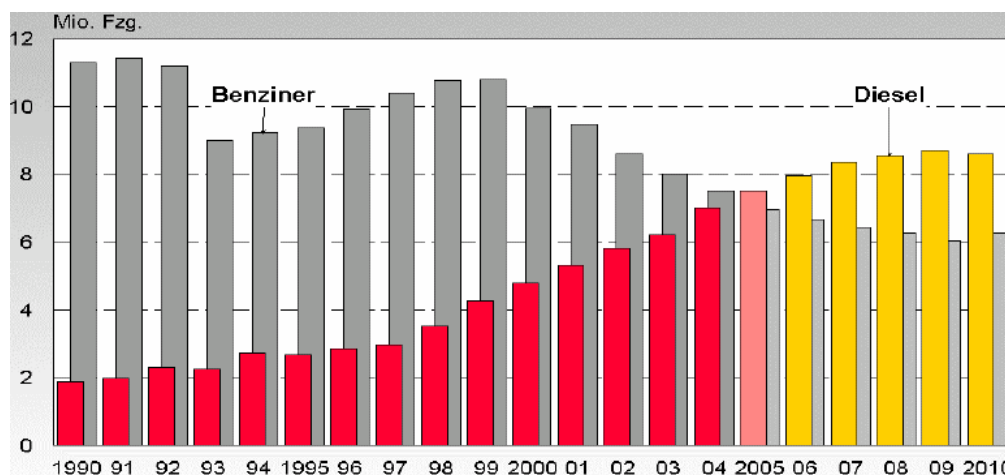


Abbildung 2-5: Neuzulassungen von Benzin- und Dieselfahrzeugen in Westeuropa [Polk Marketing Systems 2005].

Während in den USA die Vorbehalte gegenüber dem Dieselantrieb für PKW schrittweise geringer zu werden scheinen, ist eine solche Entwicklung in Japan noch nicht auszumachen. Insgesamt sind die Marktanteile des Dieselmotors jedoch in beiden Märkten mit weniger als einem Prozent sehr gering [Automobilindustrie 2007, S. 56; Peitsmeier 2006]. Der US-Verbraucher gleicht den Aufpreis für einen Volkswagen Jetta TDI aufgrund der Kraftstoffeffizienz nach 53.000 Meilen zwar wieder aus, aber die bis zu diesem Zeitpunkt vergleichsweise niedrigen Kraftstoffpreise, geringen Verbrauchsvorgaben (siehe Abschnitt 2.4: CAFE-Standards) und das negative Image verhindern eine Marktdurchdringung in den USA. Zudem bleibt das Schadstoffproblem: Um die strengen Abgasstandards in den USA und insbesondere

in Kalifornien einzuhalten, sind neben Partikelfiltern zusätzliche und kostenintensive technische Maßnahmen zur NO_x -Reduktion erforderlich. Das erhöht die Kosten des Dieselantriebs im Vergleich zum Benzinantrieb zusätzlich und verringert die Marktchancen [ACEA 2001; ACEA 2002a; Brendel 2005; White 2004]. Vor dem Hintergrund der hohen Rohölpreise rückt der Dieselmotor indes sowohl in der Fachpresse als auch beim Kunden in den USA immer mehr ins Blickfeld. Sparsamkeit und Leistungsfähigkeit schließen sich nicht mehr aus, der amerikanische Kunde betrachtet den Diesel zunehmend als Alternative zum Ottomotor [Car and Driver 2004]. Um diesen Stimmungswandel zu unterstützen, versuchen deutsche Hersteller und deren Zulieferer in den USA, den Dieselantrieb weiterhin offensiv zu vermarkten und mit Hilfe von Allianzen die Verbreitung und Qualität von Dieselmotor zu verbessern [Tierney 2005a, Weber 2004; GAIM 2003].

Infolge der auf NO_x ausgerichteten Abgasgesetzgebung, des geringen Preisunterschiedes zwischen Benzin- und Dieselmotor und der niedrigen Fahrleistungen im Benzinmotormarkt Japan sinken die Dieselanteile nach kurzzeitigem Interesse an verbrauchsarmen Geländewagen (SUV) seit 1990 rapide. Das Image des Dieselantriebs ist in Japan festgeklopft im Bereich der schweren Lastkraftwagen und Arbeitsmaschinen. Die japanischen Kunden haben keinen Verbrauchsvorteil, Toyota und Nissan ziehen sich daher aus dem japanischen Dieselmotor zurück [VTT 2000a; VTT 2003a; METI 2005; VTT 2004a; VTT MTN 2004c; JT 1999]. Nach repräsentativen Umfragen gibt es zwar bei 45 Prozent der Befragten ein „Interesse“ an (europäischer) Dieselmotor, mehrheitlich (über 70 Prozent) lehnen die japanischen Kunden Diesel-PKW, wie in Abbildung 2-5 ersichtlich, aber ab („schmutzige Abgaswolken, lautes Geräusch und rauher Motorlauf, Gesundheitsschäden durch Ruß“ [AT 2005; VTT 2000b; JT 2000]).

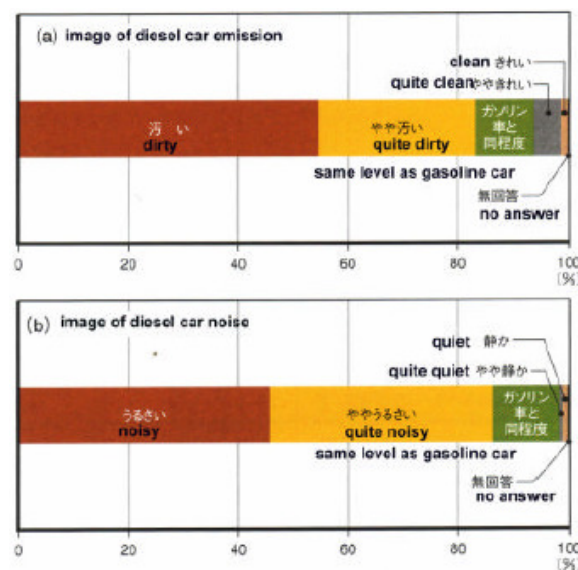


Abbildung 2-6: Image von Dieselfahrzeugen in Japan [AT 2005]

Ursache für das schlechte Ansehen ist die im Vergleich zu Europa veraltete Technik – meist ohne Möglichkeit zur Nachrüstung. Die Bevölkerung in den Ballungsregionen sieht sich in

ihren ohnehin engen und extremen Klimaschwankungen ausgesetzten Lebensbedingungen zusätzlich belastet. Eine steuerliche Förderung des Diesels wie in Europa gibt es in Japan nicht. Vielmehr sehen sich die Kommunen nach Luftqualitätsmessungen und Bürgerklagen veranlaßt, mit Hilfe von ‚Anti-Diesel-Kampagnen‘, lokalen Abgasgrenzwerten und innerstädtischen Fahrverboten lenkend in den Verkehr einzugreifen [VTT 2003a; METI 2005; Tokyo Metropolitan Government 2003, S. 1ff.]. Darüber hinaus ist die für moderne Dieselmotoren notwendige Kraftstoffqualität noch nicht flächendeckend verfügbar [PAJ 2006]. Informationskampagnen seitens europäischer Hersteller werten das Image des Diesels in Japan bisher nur schrittweise auf, sodaß der Dieselmotor insgesamt rückläufig ist [VTT 2001a, DC 2001; ACEA 2004f; Millington 2000; Margaria 2000]. Berichte über Dieseltechniken finden sich in der Tagespresse kaum und die differenzierter berichtende Motorfachpresse hat eine geringe Auflagenstärke, so daß sich in der breiten Bevölkerung ein diffuses Meinungsbild zum Thema Diesel entwickelt [Yano 2005a; VTT 2004b; VTT MTN 2004c]. Das Potential von Dieselfahrzeugen in unterschiedlichen Regionen findet sich in Abbildung 2-6.

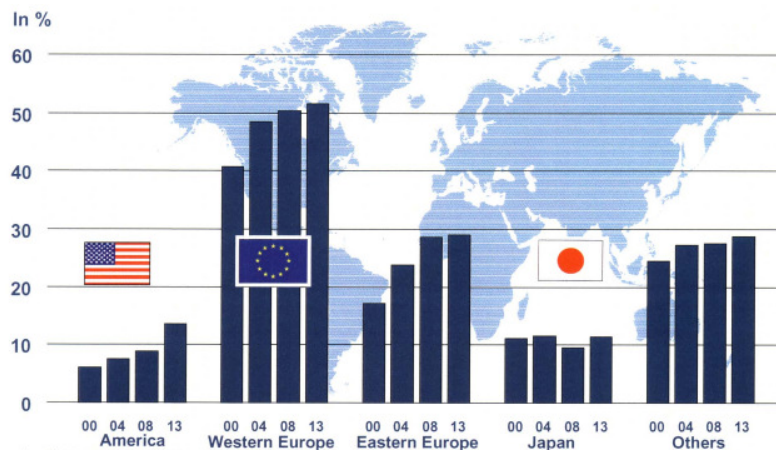


Abbildung 2-7: Marktanteil von Dieselfahrzeugen nach Regionen (inkl. LKW und Bussen) [Bosch 2004]

Wegen der unterschiedlichen Anforderungen an die lokalen Märkte gibt es auch in Zukunft deutliche Unterschiede bei der Marktdurchdringung von Dieselfahrzeugen. Gleichwohl ist nach Meinung von Experten mit einem weltweit deutlichen Anstieg von Dieselfahrzeugen zu rechnen [Hadler 2005; J.D. Power 2006].

2.3.5 Elektrische Antriebe

Elektrofahrzeuge nutzen einen Elektromotor als Antrieb und führen die benötigte Energie in Form von Akkumulatoren mit sich. Fahrzeuge mit elektrischen Antrieben emittieren keine direkten Luftverunreinigungen. Indirekte Emissionen entstehen indes in den Kraftwerken. Abschnitt 2.3.5.1 erläutert die Funktionsweise von Elektroantrieben. Abschnitt 2.3.5.2 zeigt deren Marktpotential auf.

2.3.5.1 Funktionsweise von Elektroantrieben

Der Elektroantrieb ist geräuscharm, frei von (direkten) Emissionen, vermeidet gegenüber Verbrennungsmotoren große Abwärmemengen, hat also hohe Wirkungsgrade und kann mit der Stromversorgung eine bestehende Infrastruktur nutzen. Die Bezeichnung als ‚Zero Emission Vehicle‘ (ZEV)¹⁹ bezieht sich nur auf die direkten Verunreinigungen beim Fahrzeugbetrieb und nicht auf die bei der Herstellung elektrischen Stroms in Kraftwerken nach dem jeweiligen Energiemix (indirekt) entstehenden Emissionen. Reine Elektrofahrzeuge beziehen ihre Antriebsenergie ausschließlich aus einer mitgeführten Traktionsbatterie und der Elektroantrieb wirkt als einzige Antriebsart auf die Räder [Braess und Seifert 2003, S. 122].²⁰ Im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren ist bei Elektrofahrzeugen der Energiespeicher für die Fahrleistungen verantwortlich. Dieser Speicher sorgt auch für die Energierückgewinnung aus Bremsvorgängen. Als Energiespeicher kann zum Beispiel eine elektrochemische Batterie (Nickel-Metallhydrid- und Lithiumbatteriesysteme) oder eine – technisch aufwendigere – Brennstoffzelle (siehe 2.3.7) mit zugehörigem Kraftstoffbehälter Verwendung finden. Die Traktionsbatterie ist die wichtigste Komponente des Elektrofahrzeugs. Der Energieinhalt der Batterie bestimmt die Reichweite, während das Batteriegewicht und die abgebbare elektrische Leistung die Fahrleistung beeinflussen. Zudem sollten die Batterien sicher sein und eine lange Lebensdauer aufweisen. Schließlich sind die Batteriekosten entscheidend für die Vermarktung [Cookson 2005; Dudenhöffer 2005a; Braess und Seifert 2003, S. 128]. Bei Elektro(straßen)fahrzeugen²¹ ist wegen der geringen Energiedichte der Batterien die Reichweite gegenüber Verbrennungsmotoren deutlich geringer. Auch die Höchstgeschwindigkeit ist auf ungefähr 130 Stundenkilometer begrenzt. Zur Aufladung der Batterien kann zwar jede Haushaltssteckdose genutzt werden, mit dieser stehen aber maximal 3,7 kW elektrische Leistung zur Verfügung, so daß pro Stunde Ladezeit nur für eine Fahrstrecke von bis zu 20 km nachgeladen werden kann. Verglichen mit den Tankzeiten von Dieselmotoren liegen die Nachladezeiten für Elektrofahrzeuge somit bei gleichen Fahrstrecken und vergleichbaren Fahrzeugen um etwa den Faktor 100 höher. Trotz des Potentials elektrischer Antriebe bei der Smogreduzierung in Metropolregionen beschränkt sich der Anteil des Elektroantriebes aufgrund der aufgezeigten Nachteile auf Nischenmärkte [Bosch 2002, S. 639; DLR 2002, S. 34].

2.3.5.2 Marktpotential von Elektroantrieben

In Anbetracht verschärfter Abgasgesetzgebung und der Forderung nach ZEVs auf unterschiedlichen Märkten treiben Hersteller die Entwicklung von Elektrofahrzeugen weiter voran.

¹⁹ siehe ‚ZEV-Gesetzgebung‘ des US-Bundesstaates Kaliforniens unter 2.4.

²⁰ Bei Hybridfahrzeugen sind mindestens zwei unterschiedliche Antriebsarten wirksam, einer davon meist ein Elektroantrieb (siehe 2.3.6) [Braess und Seifert 2003, S. 122].

²¹ Nach Aufgabengebiet lassen sich Batterie-Elektrofahrzeuge in Flurförderfahrzeuge für innerbetriebliche Transportaufgaben und Elektrostraßenfahrzeuge unterteilen.

Der Schlüssel zum Markterfolg von Elektrofahrzeugen liegt – bei ausschließlicher Betrachtung der fahrzeuginternen Systeme – in der Entwicklung leistungsfähigerer Akkumulatoren. Im Hinblick auf Beschleunigungsvermögen und hohe Geschwindigkeiten erweisen sich Elektrofahrzeuge als vollwertige Fahrzeuge. Allerdings sind aus Sicht des Nutzers die begrenzte Reichweite, das erhöhte Gewicht des elektrischen Antriebs und die hohen Anschaffungskosten ein Nachteil. Vorteile des Elektroantriebes liegen in der Umweltfreundlichkeit und Geräuscharmheit. Ob sich Elektrofahrzeuge langfristig auf dem Markt durchsetzen werden, wird sich nicht zuletzt in Kalifornien mit der strengen ZEV-Gesetzgebung entscheiden (siehe 2.4) [Braess und Seifert 2003, S. 129; JAMA 2005a, S. 47]. Da wesentliche Fortschritte bei der Akkumulatorentwicklung immer mit Technologiesprüngen zusammenhängen, ist die zukünftige Leistungsentwicklung nur schwer vorhersehbar. Insgesamt sind die Prognosen für die Zukunft des Elektroantriebs daher noch sehr mit Unsicherheiten behaftet [SRU 2005, S. 164f.; Bady und Renner 2005].

2.3.6 Hybridantriebe

Im Gegensatz zu reinen Elektroantrieben sind bei Hybridfahrzeugen mindestens zwei unterschiedliche Antriebsarten wirksam, einer davon meist ein Elektroantrieb. Abschnitt 2.3.7.1 erklärt die Funktionsweise von Hybridantrieben. Abschnitt 2.3.7.2 untersucht das Marktpotential.

2.3.6.1 Funktionsweise des Hybridantriebs

Entwicklungsziel des Hybridantriebs ist es, verschiedenartige Antriebskomponenten elektronisch so zu kombinieren, daß die jeweiligen Vorzüge bei unterschiedlichen Betriebszuständen zum Tragen kommen und insgesamt gegenüber dem erhöhten technischen Aufwand von Hybridantrieben überwiegen. Die Kombination aus Elektro- und Verbrennungsmotor als Benzin- oder Dieselantrieb ist eine hochkomplexe Technologie, weil zwei verschiedenartige Antriebsaggregate gleichzeitig oder wechselseitig so aktivierbar sein müssen, daß sie den Fahrbetrieb und Fahrkomfort nicht beeinträchtigen. Der Vorteil des Verbrennungsmotors als Fahrzeugantrieb liegt in der höherer Leistung und Reichweite. Die Nachteile, und damit der Anstoß, den Verbrennungsmotor zu einem Hybridmotor zu erweitern, liegen im Absinken des Wirkungsgrades bei Teillast sowie im nicht-emissionsfreien Betrieb. Bei Hybridantrieben aus Verbrennungsmotor und Elektroantrieb wird deshalb der Verbrennungsmotor nur für die mittlere Fahrleistung bemessen. Die Leistungsunterschiede zur momentan benötigten Fahrleistung werden durch den zusätzlichen elektrischen Speicher gedeckt [Bosch 2002, S. 645, Hack 2004a; Naunin 2004, S. 65ff.]. Andererseits haben Hybridfahrzeuge im Vergleich zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen aufgrund der zusätzlichen Baugruppen (z.B. Elektromotor, Batterie) ein höheres Gewicht, was dem Ziel der Verbrauchs- und Emissionssenkung zuwiderläuft [Schmidt et. al 2004]. Bei der nächsten Generation von Hybridfahrzeugen ist jedoch mit Lithium-Ionen-Batterien zu rechnen, die über eine wesentlich höhere Leistungsdichte ver-

fügen und damit weniger Raum und Gewicht einnehmen. Die Weiterentwicklung hat zum Ziel, die Kosten zu senken und die Lebensdauer zu erhöhen [Cookson 2005; Dudenhöffer 2005a, Braess und Seifert 2003, S. 128].

Hersteller sehen Hybridfahrzeuge als Überbrückungstechnologie zum Brennstoffzellenantrieb und treiben die Entwicklung entsprechend voran [Bosch 2002, S. 645; DLR 2002, S. 26ff.; Toyota 2005].²².

Je nachdem, wie die beiden Motoren gekoppelt sind und wie diese auf den Antriebsstrang einwirken, ergeben sich die serielle, die parallele oder die gemischte Anordnung (Abbildung 2-7).

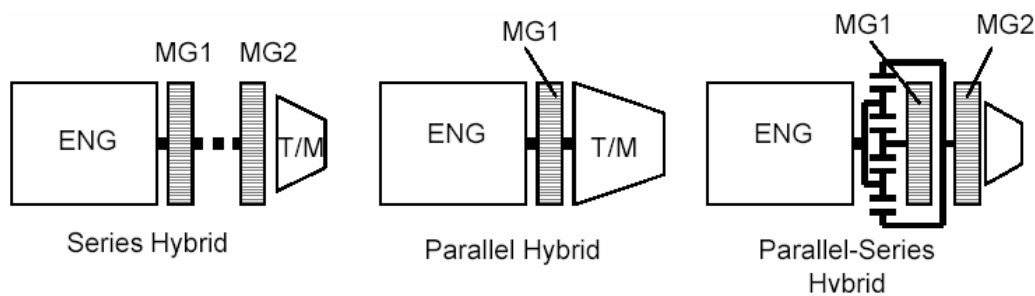


Abbildung 2-8: Hybride Antriebskonfigurationen [Oba et. al 2004]

Bei der seriellen Anordnung (Serienhybrid oder Series Hybrid) wird die gesamte Leistung des Verbrennungsmotors (ENG) über einen Generator (MG) in elektrische Energie umgewandelt, es erfolgt eine mechanische Entkopplung des Verbrennungsmotors vom Antriebsstrang (T/M). Dem Vorteil eines stets im verbrauchsgünstigen und emissionsarmen Bereich betriebenen Verbrennungsmotors mit konstanter Drehzahl stehen die Nachteile der mehrfachen Energieumwandlung und des schwergewichtigen Elektroteils gegenüber; als mechanischer Wirkungsgrad zwischen Verbrennungsmotor und Antriebsachse werden nicht mehr als 55% erreicht. Der Serienhybrid kommt meist bei Omnibussen und bestimmten Nutzfahrzeugen zur Anwendung [Bosch 2002, S. 647; Lutz 2004; Hack 2004a].

Bei Parallelhybriden (Parallel Hybrid) erfolgt eine mechanische Kopplung der Antriebsleistung der beiden direkt mit dem Antriebsstrang verbundenen Motoren, die einzeln oder gemeinsam betrieben werden können. Die parallele Anordnung hat den Vorteil, daß die beiden Antriebseinheiten wegen der Leistungsaddition jeweils kleiner dimensioniert werden können, als das bei einem vergleichbaren konventionellen Fahrzeug der Fall wäre [Bosch 2002, S. 646f.; Naunin 2004, S. 67]. Beim Bremsen und beim Ausrollen des Fahrzeugs und beim Abschalten des Motors kann der Generator dann die verbleibende Schwunghenergie bzw. kinetische Energie in elektrische Energie umsetzen (automatische Start/Stop-Funktion und Rekuperation). Diese Rückgewinnung arbeitet am besten im städtischen Stop-and-Go-Verkehr. Bei

²² Hybridantriebe mit mechanischem und elektrischem Speicher sollen an dieser Stelle nicht weiter erläutert werden [siehe Bosch 2002, S. 645f.].

konstanteren Fahrbedingungen wie auf der Autobahn bleibt dieser Effekt aus [Bosch 2002, S. 932; Schäfer 2004].

Das Split-Hybrid-Konzept, wie beim Toyota Prius der zweiten Generation²³, gleicht der Überlagerung serieller und paralleler Anordnungen und entspricht einem Getriebe mit Leistungsverzweigung und stufenlos veränderlicher Übersetzung. Einerseits wird die Leistung des Verbrennungsmotors unmittelbar mechanisch den Antriebsrädern zugeführt und andererseits ist die Drehzahl des Verbrennungsmotors wegen der Drehzahlüberlagerung im Planetensatz von der Drehzahl der Antriebsräder entkoppelt [Schäfer 2004; Bosch 2002, S. 647; Naunin 2004, S. 165ff.]. Beim Prius II sorgt ein Ottomotor mit 57kW, zwei elektrische Maschinen mit 10 (Starter/Generator) und 50kW Leistung (Antriebsmotor), ein Planetengetriebe und eine komplizierte Regelelektronik für hohe Leistung. Der Fahrkomfort ist dabei nicht – wie bei früheren Konzepten – auf elektrische Traktion ausgelegt. Die Leistungsverzweigung über das Planetengetriebe erlaubt den Antrieb nur über den Elektromotor oder allein über den Verbrennungsmotor sowie durch beide Maschinen.²⁴ Damit ist kurzfristig auch reiner Elektrovortrieb möglich. Als Split-Hybrid sucht sich das Fahrzeug, unterstützt durch das Antriebsmanagement, immer den optimalen Systemwirkungsgrad, das heißt zum Beschleunigen und für Steigungen steht zusätzlich kurzzeitig die Leistung des Antriebsmotors von 50kW zur Verfügung. Aus dem Schrittverkehr heraus kann mit dem sehr hohen Drehmoment des Elektromotors beschleunigt werden [Barske 2004, Hack 2004a]. Der Kraftstoffverbrauch ist niedrig und entspricht 4,3l/100 km im NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus), die geringen Kohlendioxidemissionen liegen bei 104g CO₂/km. Die Schadstoffgrenzwerte der Euro 4-Norm werden um 88 Prozent unterschritten. Die Batterie lädt sich durch Rekuperation wieder auf, ist mit 1,2 kWh vergleichsweise klein und die Zusatzmasse bleibt auf 40 kg beschränkt, was für mehrere Kilometer rein elektrischen Betriebes im Stadtverkehr ausreicht. Den Nachteilen bei konstanteren Fahrbedingungen steuert Toyota mit dem vergleichsweise kleinen Ottomotor entgegen (57kW und 1,5l Hubraum). Im Zuge dieses Motoren-Downsizing wird der Schwerpunkt vom Verbrennungsmotor ohne Leistungseinbußen hin zu den elektrischen Maschinen verlagert [Schäfer 2004, Barske 2004]. Die gleiche Technik nutzt auch das Oberklasse-Fahrzeug von Toyota Lexus RX 400h, das mit 9,1l/100km weit unter dem Schnitt benzingetriebener Geländewagen verbraucht, vergleichsweise wenig Kohlendioxidemissionen (192 g CO₂/km) ausstößt und dabei kurzfristig bis zu 200kW abrufen kann [Hagenbüchle 2005, Urnishi 2005, Lexus 2005].

Alternativ zu der im Toyota Prius II oder Lexus RX 400h zur Anwendung kommenden Full-Hybrid-Lösung bietet Honda im Insight und Civic IMA²⁵ die wegen seiner geringen elektri-

²³ Hybrid Synergy Drive (HSD)

²⁴ Die Leistungsverzweigung ist sehr kompliziert und hängt vom Aufbau des Systems ab.

²⁵ Integrated Motor Assist (IMA)

schen Leistung sogenannte Mild-Hybrid-Lösung an. Die schmale Starter-Generator-Batterie sitzt zwischen Motor und konventionellem Schaltgetriebe und unterstützt den Verbrennungsmotor. Wegen der geringen Leistung von 6,5kW ist der Elektroantrieb schlecht zum reinen Vortrieb geeignet. Gleichwohl lassen sich damit über Start/Stop-Automatik, Rekuperation und Downsizing gleichartige Verbrauchs- und Abgasminderungen erreichen (4,9 l/100km im NEFZ und 116 gCO₂/km).²⁶ Vorteil dieser Variante ist die einfache Integration in das vorhandene Antriebssystem und die Fahrzeuge sowie ein geringeres Gewicht und Volumen [Hack 2004a, Barske 2004; Honda 2005]. Der sogenannte Micro-Hybrid mit einer typischen Leistung von 2kW dient als Anfahr- und Bremsunterstützung [Naunin 2004, S. 70].

Insgesamt hängt der Verbrauch der Hybridfahrzeuge stark vom Fahrprofil ab. Im praktischen Fahrbetrieb verbrauchen die Fahrzeuge meist mehr als in amtlichen ECE-Fahrzyklen mit hohem Leerlaufanteil und häufigen Beschleunigungs- und Bremsphasen. Vorteile hat der geräuscharme Hybridantrieb im Stadtverkehr oder auf Strecken mit häufig wechselnder Last. Bei gleichmäßigem Fahren oder hohem Autobahntempo besteht kein signifikanter Vorteil [Hack 2004c].

2.3.6.2 Marktpotential des Hybridantriebs

Ungeachtet der (anfänglichen) Skepsis unter Experten hat die serienfähige Kombination aus Benzin- und Elektroantrieb Chancen, sich neben den reinen Verbrennungsmotoren mittelfristig als dritte Kraft in der Antriebstechnik zu etablieren. Dafür sorgt einerseits die Steuer- und Abgasgesetzgebung (EU-5 oder US-Gesetzgebung), die auf einen geringen Verbrauch zielt, die Produktion von Dieselfahrzeugen durch Abgasnachbehandlung verteuert und Hybridfahrzeuge staatlich subventioniert. Andererseits tragen die Hersteller in der aktuellen Phase der Marktdurchsetzung die Mehrkosten der neuen Technologie und geben diese nur zum Teil an die Kunden weiter. Schließlich befindet sich der Hybridantrieb erst am Beginn der Entwicklung zum Massenprodukt; die Systemkosten sinken durch höhere Stückzahlen [AW Knowledge 2005a]. Das gilt insbesondere für die derzeit noch nicht serienreifen Hybridantriebe mit Dieselaggregat.

Im Wettlauf um Marktanteile in dicht besiedelten Regionen der USA und Japan spielen die innerstädtisch sparsameren Hybridfahrzeuge eine zunehmend wichtigere Rolle. Honda und Toyota haben Ende der 1990er Jahre mit der Serienproduktion begonnen. Inzwischen hat sich Toyota in der Hybridtechnologie einen technologischen Vorsprung erarbeitet. Der Markt für Hybridfahrzeuge ist heute mit 90 Prozent aller verkauften Hybridfahrzeuge auf die USA und Japan konzentriert und eine Alternative zum Dieselantrieb, der in diesen Ländern keine Verbreitung hat. 2004 verkauften die Hersteller in den USA 85.000 Fahrzeuge.²⁷ Damit haben

²⁶ Zum Vergleich: Der Golf 1.9 TDI verbraucht 5,1 l/100km nach ECE-Fahrzyklus [Hack 2004c].

²⁷ Zum Vergleich: Deutschland hat in 2004 1800 Hybridfahrzeuge neu zugelassen.

Hybridkonzepte einen Marktanteil von nur 0,5 Prozent am US-Gesamtmarkt von fast 17 Millionen Fahrzeugen. Gleichwohl entwickeln sich die USA wegen der hohen Rohölpreise schrittweise zum Schlüsselmarkt für Hybridfahrzeuge. Die Modellpalette ist zwar noch sehr beschränkt – 53.600 Fahrzeuge und damit zwei Drittel der verkauften Hybridfahrzeuge in 2004 entfielen allein auf den Full-Hybrid Toyota Prius II²⁸ – doch die Beliebtheit der Fahrzeuge steigt rasant [Hagenbüchle 2005; Dudenhöffer 2005a; Hofmann und Herz 2005; Müller-Wondorf 2005; VTT MTN 2003a]. 2005 wurden 206.000 Hybridfahrzeuge verkauft, davon 109.000 Prius II. Das entspricht einem Hybridanteil von 1,2 Prozent. Das Prognoseinstitut B&D Forecast erwartet einen Hybridabsatz in den USA von 1,2 Millionen Fahrzeugen im Jahr 2010, bis 2015 steigt die Zahl dann auf 3 Millionen, in Japan auf 1 Million und weltweit auf 5 Millionen Fahrzeuge [Maurer 2004; Dudenhöffer 2005a]. Mit einem Preis von 20.875 US-Dollar ist der Prius II 3.000 US-Dollar teurer als vergleichbare Fahrzeuge, aber mit Einführung der Hybridversion des erfolgreichen Camry zielt Toyota langfristig auf Marktdurchsetzung in den USA. Mit der Nobeltochter Lexus (RX 400H, LS 600H) und dem Toyota Highlander bietet Toyota auch auf dem Oberklassemarkt die in den USA beliebten Geländewagen (SUV) an. Weitere Hersteller ziehen nach und kooperieren miteinander oder bieten, wie etwa Ford (Mazda), Fahrzeuge mit Toyota's Hybrid-Lizenzen an [ORNL 2004; Shirouzu und Sapsford 2005, Smith 2005, Dawson 2005; VTT MTN 2004a]. Die europäischen Konkurrenten, wie Porsche, Audi und Volkswagen, führen ‚eigene‘ Hybrid-Serienmodelle (z.B. Volkswagen Polo, Volkswagen Golf) erst bis Ende 2008 ein [Volkswagen 2007a; Trechow 2005, Wagner 2005]. Nach Expertenmeinung haben die Technikpioniere Toyota und Honda einen Entwicklungsvorsprung von ungefähr vier Jahren vor amerikanischen und europäischen Herstellern [Hofmann und Herz 2005, Dudenhöffer 2005a]. Im Gegensatz zu Toyota hat Honda keine äußerliche Differenzierung zu den Serienmodellen.²⁹ Darüber hinaus ist das lautlose Fahren ohne Verbrennungsmotor mit der Mild-Hybrid-Technik von Honda nicht möglich. Fahrkomfort in Form hoher Drehmomente und geringem Verbrauch führt zu einem hohen Kundennutzen und einem wichtigen Kaufgrund bei den von Toyota angebotenen Fahrzeugen. Zudem fahren Hybridfahrzeuge in Road-Pricing-Zonen kostenlos, haben oft Zugang zu Sonderspuren³⁰ und sind meist steuerlich begünstigt. Schließlich begünstigt die US-Gesetzgebung Hybride als ‚Zero Emission Vehicle‘, die ab 2008 einen Verkaufsanteil von vier Prozent abdecken sollen. Der Hybridantrieb ist damit kein „grün-alternatives Nischenprodukt“ [Hagenbüchle 2005] mehr, sondern verkörpert bei einer breiteren Zielgruppe modernen Fahrspaß [Tierney 2005a]. Der Hybridantrieb hat dabei ein hohes Prestige und muß

²⁸ Damit ist der Prius in den USA so erfolgreich wie die Mercedes E-Klasse oder fast so verkaufsstark wie die BMW 5-er und 7-er zusammen [Dudenhöffer 2005a].

²⁹ Zum Beispiel: Honda Civic Hybrid

³⁰ High-Occupancy Vehicle Lanes (HOV): Sonderspuren auf Autobahnen, die sonst nur für Busse und Personenkraftwagen mit mehr als zwei Insassen reserviert sind.

nicht wie etwa der Diesel tief verwurzelten Vorurteilen entgegenzutreten.³¹ So entwickelt sich nach Meinung von Experten die Hybridtechnologie als Übergang zu Brennstoffzellenantrieben mittelfristig zum Markterfolg in den USA: Abgesehen von den steigenden Verkaufszahlen für Hybridfahrzeuge steigen auch die Lizenzgebühren der Konkurrenz. Schließlich ist für den Marktführer Toyota das positive Image des neuen Konzepts genauso wichtig wie der Absatz [Automobilproduktion 2005, S. 18ff.; Hofmann und Herz 2005; Mollet 2005].

Der japanische Markt erfüllt – unterstützt durch Steuererleichterungen – hierbei die Aufgabe eines Testmarktes für Hybridfahrzeuge. Die japanischen Hersteller entwickeln vor Ort – und teilweise gemeinsam – Hybridantriebe, um damit auch neue Märkte in Asien, den USA und Europa zu beliefern. Darunter befinden sich beliebte Modelle wie der Alphard (Einführung im Mai 2003) und der Harrier (Einführung 2004) [VTT MTN 2002a; Nikkei Weekly 2002; Yano 2005b]. Honda untersucht dabei intensiv die Marktchancen des Hybridantriebs in China [VTT MTN 2004a]. Toyota hat beispielsweise ab Mitte 2004 mit Marketingaktivitäten für den Prius, insbesondere in den chinesischen Metropolen Shanghai und Peking, begonnen [VTT MTN 2003a].

Im Dieselmotor Europa spielt die Mischmotorisierung der japanischen Hersteller keine Rolle. Im Vergleich zum Diesel hat der Hybridantrieb bei europäischen Fahrbedingungen keinen Verbrauchsvorteil. Trotzdem treibt neben der Rußfilterdiskussion die Selbstverpflichtung auf Werte von 140g CO₂/km bis 2008 die europäischen Automobilhersteller an, neue Wege zu beschreiten [Wagner 2005]. In Deutschland wird der Prius II für etwa 24.000 EUR angeboten und ist damit etwa 4.000 EUR teurer als vergleichbare Fahrzeuge (Stand 2004). 2004 setzte Toyota 1500 Fahrzeuge in Deutschland ab, 2005 sind es etwa 3000 [Dudenhöffer 2005a; Ostmann 2004, Peters 2005]. Mit der Einführung schärferer europäischer Abgasgrenzwerte und der damit verbundenen Kosten einer umweltfreundlicheren Dieselmotorisierung kann der Hybridantrieb indes eine Alternative zum herkömmlichen Verbrennungsmotor werden [Fukui 2003].

2.3.7 Brennstoffzellenbetrieb

Bei einem Brennstoffzellenantrieb handelt es sich nicht um einen neuen Motor. Das Brennstoffzellenfahrzeug ist mit einem Elektromotor vergleichbar, der die Batterie durch eine neue Form der Stromerzeugung ersetzt. Kapitel 2.3.7.1 erklärt die Funktionsweise der Brennstoffzelle und Kapitel 2.3.7.2 bewertet deren Marktpotential.

³¹ Experten wählten den Toyota Prius in den USA zum „North American Car of the Year 2004“. Dagegen kauften die Amerikaner nur 50.000 Dieselfahrzeuge [Gäthke 2004, AW Knowledge 2004].

2.3.7.1 Funktionsweise der Brennstoffzelle

Bei Elektroantrieben werden die Verluste und Emissionen bei der Umwandlung von Primär- in Nutzenergie von der Straße zum Kraftwerk verlagert. Theoretisch handelt es sich bei Kraftfahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb um Elektrofahrzeuge, welche ihre Energie statt aus einer Batterie aus einer Brennstoffzelleneinheit beziehen [Naunin 2004, S. 132; Braess und Seiffert 2003, S. 129]. Brennstoffzellen als Energieträger sind elektrochemische Zellen, mit denen die chemische Energie eines geeigneten Brennstoffs mit Sauerstoff (O_2) aus der Luft kontinuierlich in elektrische Energie gewandelt werden kann.

Als Brennstoffe kommen hauptsächlich Wasserstoff (H_2) und Methanol (CH_3OH) in Betracht. Herkömmliche Kraftstoffe sind nicht direkt einsetzbar und müssen erst durch eine chemische Reformierungsreaktion („On-Board-Reformer“) in Wasserstoff umgewandelt werden. Brennstoffzellensysteme bilden ein Antriebskonzept mit wesentlichen Vorteilen [Morisaki 2002, S. 20ff.; DLR 2002, S. 35; Bosch 2002, S. 648]:

- hoher Wirkungsgrad
- lange Betriebsdauer
- geringe Lärmemissionen
- bei Wasserstoff-Brennstoffzellensystemen keine Schadstoffemissionen am Fahrzeug
- bei Methanol-Brennstoffzellensystemen geringe Kohlenwasserstoffemissionen und gegenüber Verbrennungsmotoren deutlich verringerte Kohlendioxidemissionen und Vermeidung von NO_x und CO-Emissionen.
- minimale Emissionen über die Umwandlungskette von Primär- in Nutzenergie.
- Vereinbarkeit mit alternativen Energiequellen (z.B. Erdgas, nachwachsende Rohstoffe),
- Reichweiten und Wiederbefüllung vergleichbar mit heutigen Verbrennungsmotoren.

Aufgrund dieser Eigenschaften und neuer aussichtsreicher Entwicklungen auf dem Gebiet der Niedertemperatur-Brennstoffzelle (PEM-Brennstoffzelle³²) sehen viele Hersteller im Brennstoffzellenantrieb für Kraftfahrzeuge eine Alternative zum Verbrennungsmotor. Im Falle der Emissionen dürfen nicht nur die direkten, sondern müssen auch die indirekten, in der Vorkette der Brennstoffgewinnung anfallenden Emissionen berücksichtigt werden.³³ Umweltfreundlich ist die Technologie also nur unter der Voraussetzung, daß zur energieaufwendigen Produktion des Wasserstoffs regenerative Energien (z.B. Biomasse, Wind) eingesetzt werden [Oertel und

³² PEM: Polymer-Electrolyt-Membran

³³ Derzeit gibt es insbesondere zwei Möglichkeiten zur Gewinnung von Wasserstoff: (1) die chemische Extraktion aus fossilen Kohlenwasserstoffen (z.B. Erdgas), wobei Kohlendioxid entsteht. (2) die Spaltung von Wasser mit Hilfe von Elektrizität (Elektrolyse). Sofern diese aus Kohlekraftwerken stammt, wird indirekt Kohlendioxid emittiert. Bei einem Atomkraftwerk fällt strahlender Abfall mit den entsprechenden Problemen bei der Deponie an [Hock 2003].

Fleischer 2001, S. 90ff.; Bunting 2004, 2005; Wells 2005a].³⁴ Das gleiche gilt für den Wirkungsgrad, der mit anderen Antrieben nur dann vergleichbar ist, wenn er die gesamte Wirkungskaskette von der Primärenergie bis zum Rad umfaßt. Eine wichtige Herausforderung ist daher die Kraftstoffbewertung und Gesamtenergiebilanzierung (Lebenszyklusanalysen). Die Hersteller stehen vor zwei Problemen: (1) die Kosten der Brennstoffzelle und die Bereitstellung von reinem Wasserstoff, der für den Betrieb von Brennstoffzellen unerlässlich ist und für den es im Moment noch keine Infrastruktur gibt, sind sehr hoch [DLR 2002, S. 34, Böhmer 2004, Braess und Seiffert 2003, S. 137]. (2) Wasserstoff hat als Treibstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge den Nachteil, daß er nur als Druck- oder Flüssigkeitswasserstoff mit befriedigender Energiedichte gespeichert werden kann. Gegenüber solchen Wasserstoffspeichern in privaten Kraftfahrzeugen bestehen aus Sicherheitsgründen erhebliche Vorbehalte [Bosch 2002, S. 648]. Die Lebensdauer von Brennstoffzellen unter dynamischen Fahrbedingungen ist zwar unsicher, mit einer alterungsbedingten Abnahme des Wirkungsgrades ist aber zu rechnen. Derzeit besitzt die Brennstoffzelle als Antriebsquelle im Fahrzeugbereich weder technische noch ökonomische Marktreife [Böhmer 2004, Bosch 2002, S. 651, Griffiths 2005, Hack 2004b] ³⁵. Zusammenfassend finden sich die Anforderungen an Kraftfahrzeug-Speichersysteme in Abbildung 2-8.

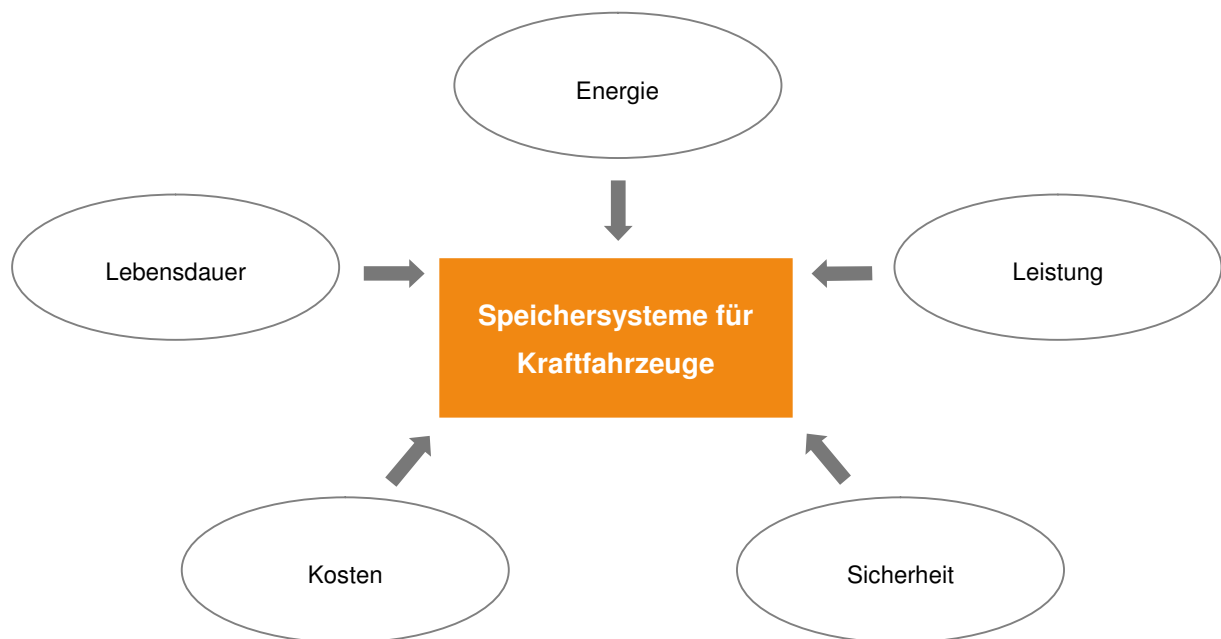


Abbildung 2-9: Energiespeichersysteme für Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeuge – Kriterien [Ullrich 2005]

³⁴ Heute werden 98 Prozent des Wasserstoffs durch ‚energieintensives‘ Aufspalten (Dampfreformierung) von Erdgas gewonnen [Küffner 2004].

³⁵ Viele Experten schätzen die Marktreife für Brennstoffzellenfahrzeuge auf das Jahr 2020 [Griffiths 2005].

2.3.7.2 Marktpotential von Brennstoffzellen

Die notwendige Wettbewerbsfähigkeit für den Beginn der Produktion von Brennstoffzellenfahrzeugen in Serie erwarten die meisten Hersteller frühestens ab 2010, wobei die meisten Hersteller 2020 als realistischer einschätzen [EU 2004; Morisaki 2002, S. 20ff.; SRU 2005, S. 195; Naunin 2004, S. 67]. Neben technischen Verbesserungen des Brennstoffzellenantriebs bei Leistungsdichte, Zuverlässigkeit und Lebensdauer versuchen die Hersteller die Kosten der Antriebstechnik zu senken und die Entwicklung der Kraftstoffinfrastruktur voranzutreiben. Durch konsequente Verringerung des systemtechnischen Aufwandes wird erwartet, daß sich die Kosten für die Stromerzeugung, wie in Abbildung 2-9 dargestellt, mit Brennstoffzellen von 1000-2000 EUR/kW bei einer stationären Brennstoffzelle über 150-200 EUR/kW bei einem Einsatz für die Stromversorgung des Bordnetzes bis auf 50-70 EUR/kW für den Serieneinsatz im Fahrzeugbetrieb reduzieren lassen [VDI 2003, S. 385]. Kritischere Quellen prognostizieren diese Kosten indes auf 795 EUR/kW im Jahr 2010 und 327 EUR/kW im Jahr 2030 [Avadijyan et al. 2003, S. 73].

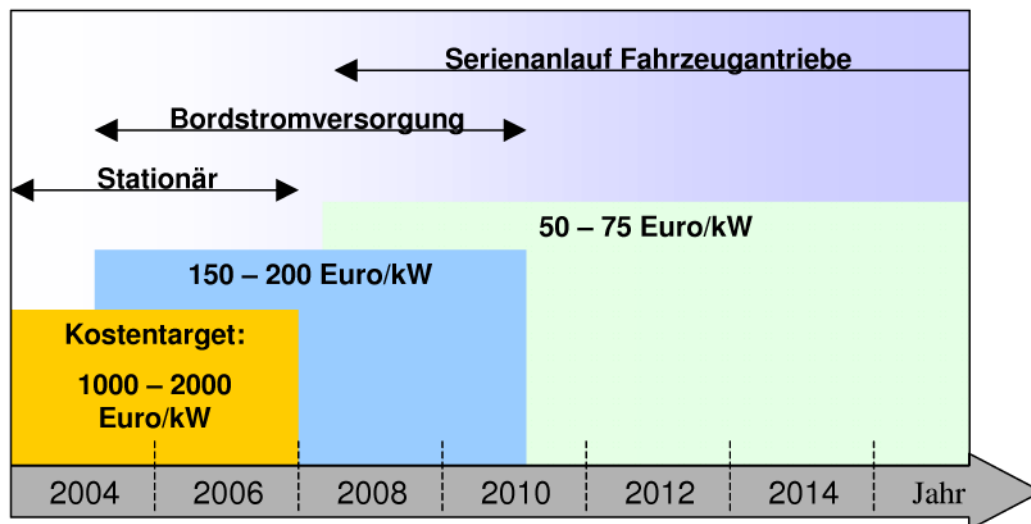


Abbildung 2-10: Markteinführungsszenarien und Kostenziele für Brennstoffzellentechnologie [VDI 2003, S. 385]

Die Kosten für Wasserstoff als Kraftstoff hängen von der Herstellungsmethode ab. Die heutige Produktionsmenge an Wasserstoff liefert nur einen Bruchteil der zukünftig erforderlichen Mengen, so daß ein massiver Ausbau der Produktionskapazitäten erfolgen muß. Prognosen für das Jahr 2020 gehen davon aus, daß der Grundpreis für Druckwasserstoff aus Erdgas ohne Steuern ungefähr 0,60 EUR je $\text{m}^3 \text{H}_2$ betragen wird. Bei der Wasserstoffherzeugung durch Elektrolyse ergibt sich ein Preis von ungefähr 0,70 EUR je $\text{m}^3 \text{H}_2$ und bei Lieferung aus einer zentralen Erzeugungsanlage 1,65 EUR je $\text{m}^3 \text{H}_2$ [VDI 2003, S.429]. Bei einer Zusammensetzung von 80 Prozent H_2 aus Dampfpreformation, 10 Prozent aus Elektrolyse und 10 Prozent aus Lieferungen einer zentralen Erzeugungsanlage berechnen sich die Kosten zu 0,7 Euro pro m^3 / 0,09 kg pro $\text{m}^3 = 7,78$ Euro pro kg (0,7 Euro pro m^3 / 0,09 kg pro m^3).

Bei einem Kraftstoffverbrauch von einem Kilogramm pro 100 km ergäben sich somit Kosten von rund 7 EUR pro 100 km. Dies entspricht dem Kostenniveau eines vergleichbaren heutigen Dieselfahrzeuges [VDI 2003, S.430]. Andere Prognosen gehen verstärkt vom Einsatz alternativer Verfahren zur Wasserstofferzeugung aus und prognostizieren die folgende Preisentwicklung: Im Jahr 2005 könnte der Wasserstoff für Fahrzeuge bereits für 3 EUR pro kg hergestellt werden, im Jahr 2015 für 2,17 EUR pro kg und bis zum Jahr 2035 würden sich die Kosten nochmals auf 1,80 EUR pro kg reduzieren [Hock 2003]. Es ist somit noch nicht möglich, auf exakte Prognosen über die Preisentwicklung für zukünftigen Wasserstoff zurückzugreifen.

In den USA, Europa und Japan gibt es zahlreiche Initiativen zur Förderung von Brennstoffzellen. So wirbt der Anlagen- und Industriegasproduzent Linde für ein Netz von vierzig Zapfsäulen entlang wichtiger Verkehrsachsen [Linde 2006; Deckstein 2005]. In Berlin und Tokio eröffnen erste Wasserstofftankstellen für Versuchsfahrzeuge [VTT MTN 2002c; CEP 2006; Linde 2004; CFCP 2006]. Mit dem Ziel der schrittweisen Erreichung der Marktreife kaufen oder leasen Kommunen, Energieunternehmen, Behörden und Ministerien Prototypenfahrzeuge mit Brennstoffzellen. In Japan beträgt dabei die monatliche Leasinggebühr noch 1,2 Millionen Yen (ungefähr 10.000 EUR) [VTT MTN 2003a; VTT MTN 2003b; VTT MTN 2003d; VTT MTN 2002b; CEP 2006]. Der staatliche Forschungsetat liegt bei 22 Milliarden Yen (176 Mio. EUR) in 2002 [Schmidt 2003]. In Deutschland will das Verkehrsministerium in den nächsten zehn Jahren jährlich 50 Millionen EUR zur Entwicklung der Brennstoffzellentechnik bereitstellen [Spiegel 2006; BMVBS 2006a, 2006b].

2.3.8 Autogas und Erdgas

Erdgas unter Druck oder als Flüssiggas (Autogas) wird in Ottomotoren eingesetzt. Die Fahrzeuge sparen zwar Kraftstoff und haben geringere spezifische Schadstoffemissionen als Benzin- und Dieselfahrzeuge, die vergleichsweise aufwendige Speicherung des Kraftstoffes im Fahrzeug ist aber mit Mehrkosten verbunden. Infolge des grobmaschigen Tankstellennetzes ist es bisher noch nicht zu einer breiten Marktdurchdringung gekommen. Abschnitt 2.3.8.1 erläutert die Funktionsweise von Fahrzeugen mit Autogas und Erdgas. Abschnitt 2.3.8.2 stellt das Marktpotential vor.

2.3.8.1 Funktionsweise von Autogas- und Erdgasfahrzeugen

Autogas als Gemisch von Propan und Butan ist bei einem Druck von 8 bar flüssig und wird deshalb auch Flüssiggas genannt (Liquefied Petroleum Gas, LPG). Ende der 90er Jahre wurden jährlich etwa 10,3 Millionen t Autogas weltweit (davon 2,6 Millionen t in Europa) für den Betrieb von Verbrennungsmotoren eingesetzt. Diese Verbrauchsmengen lassen sich um ein Vielfaches steigern, falls es gelingt, im Erdöl gebundenes Gas zu nutzen. Der Mineralölsteuersatz ist entscheidend für die Rentabilität von Autogas. Der Aufbau und die Emissionswerte

der Autogas- und Erdgasanlagen sind nahezu identisch; nur in der Mitführung des Gases als Hochdruckgas (160...200 bar) oder in einem kältefesten Behälter als verflüssigtes Gas (minus 160°C) unterscheiden sich die Anlagen. Der Umbau von benzinbetriebenen Fahrzeugen auf Autogasbetrieb ist relativ leicht. Damit ist eine schnellere Marktdurchdringung möglich als bei Erdgasfahrzeugen, die als Neuwagen verkauft werden. Meist werden Ottomotoren auf bivalenten Betrieb (wahlweise Benzin und Autogasbetrieb) umgerüstet. Taxis und Omnibusse mit Autogasanlagen sind meist für monovalenten Betrieb (nur Autogasbetrieb) ausgerüstet. Da Autogas ein besonders gutes Gemisch mit Luft bildet, sind die Schadstoffemissionen deutlich niedriger als bei Benzin- und Dieselmotoren, wenn eine gleichwertige Technik wie zum Beispiel die elektronische Regelung eingesetzt wird. Der Kraftstoffverbrauch ist vergleichbar mit dem Dieselantrieb und damit geringer als beim Benzinbetrieb. Im Vergleich zu Benzin verursacht Erdgas 20 Prozent weniger Kohlendioxid. Autogas ist frei von Blei- und Schwefelverbindungen und hat sehr gute Verbrennungseigenschaften bei ausgezeichneter Gemischbildung und Gemischverteilung, was sich bei niedrigen Temperaturen noch stärker auswirkt. Den Vorteilen stehen als Nachteile eine geringere Reichweite, wenig Tankmöglichkeiten, hohes Zusatzgewicht, Sicherheitsvorschriften³⁶ und größerer Raumbedarf³⁷ gegenüber [Bosch 2002, S. 648, Sturbeck 2005].

Erdgas kann sowohl flüssig bei -160°C als LNG (Liquefied Natural Gas, LNG) oder komprimiert bei Drücken von bis zu 200 bar als CNG (Compressed Natural Gas; CNG) gespeichert werden. Der Weg des Erdgases von der Quelle zum Verbraucher über die Verflüssigungsstufe erfordert eine aufwendige Aufbereitung, sodaß das Gas gegenwärtig meist in komprimierter Form verwendet wird.³⁸ Nachteilig ist die geringe Energiedichte von Erdgas, große Speichertanks sind notwendig. Erdgas enthält jedoch mehr Wasserstoff und weniger Kohlenstoff als Erdöl, sodaß im Vergleich zum Ottomotor und unter Annahme des derzeitigen EU-Mix 20 bis 30 Prozent weniger CO₂ emittiert wird.³⁹ Abgesehen von der fast partikelfreien Verbrennung entstehen in Verbindung mit einem geregelten Dreiwegekatalysator nur sehr geringe Emissionen der Schadstoffe NO_x, CO und HC. Im Magerbetrieb sind die NO_x-Emissionen höher als beim Dreiwegekatalysator. Dieser Nachteil läßt sich genau wie beim Benzinbetrieb über aufwendigere Abgasnachbehandlungsmethoden (z.B. NO_x-Speicher-Kat) kompensieren. Erdgas

³⁶ Autogas steht unter Druck von 2...20 bar [Bosch 2002, S. 552f.].

³⁷ Die zylindrisch runden Druckbehälter benötigen größeren Raumbedarf, da die zulässige Füllmenge nur 80% des vorhandenen Rauminhaltes beträgt, der Restanteil wird als Expansionsraum für das Gas benötigt [Bosch 2002, S. 553].

³⁸ Japan ist wegen der Insellage und der weiten Entfernung zu den Lieferländern bislang der mit Abstand größte Importeur von Flüssiggas. Qatar ist nach Indonesien der größte Lieferant von LNG [Köhn 2004; Hermann 2006].

³⁹ Die kraftstoffspezifischen CO₂-Emissionen (Well-to-Tank) hängen in hohem Maße von Annahmen bezüglich der Leitungsverluste und Transportentfernungen ab, was eine differenzierte Betrachtung unter Berücksichtigung der Vorkette erfordert [Ramesohl et. al. 2003]

ist leichter als Luft und entweicht bei undichten Stellen in der Behälterwand nach oben – im Gegensatz zu Propan und Butan beim Flüssiggas, welches schwerer als Luft ist.⁴⁰ Aufgrund der geringen Reichweite und des weitmaschigen Tankstellennetzes für Erdgas hat sich der monovalente Erdgasbetrieb fast ausschließlich bei lokalen Flotten im öffentlichen Nahverkehr durchgesetzt (z.B. Busse und Taxis). Im Bereich der Personenkraftwagen sind hauptsächlich bivalente Systeme zu finden, die eine Umschaltung von Erdgas auf Benzinbetrieb erlauben. [Bosch 2002, S. 648; Carle 2004, S. 25; Seidel 2004, Braess und Seiffert 2003, S. 330]. Durch chemische Umwandlungsschritte (Fischer-Tropsch-Synthese) kann Erdgas zudem zur Produktion synthetischer Kraftstoffe (Synfuel, Gas-to-Liquid) genutzt werden. Aus energetischer und ökologischer Sicht hat Diesel aus Erdgas keine Vorteile. Im Gegenteil benötigt der zusätzliche Transformationsschritt zusätzliche Energie. Allerdings entfallen die noch zu schaffende Tankstelleninfrastruktur und die Umstellung der Fahrzeugflotte, sodaß die gesamte Fahrzeugflotte mit umgewandeltem Erdgas fahren kann. Schließlich hat synthetischer Diesel in Bezug auf Zündwilligkeit und Schadstoffgehalt eine höhere Qualität als herkömmlicher Dieselmotorkraftstoff [Volkswagen 2003, Ramesohl et al. 2003; Köhn 2004].

2.3.8.2 Marktpotential von Autogas- und Erdgasfahrzeugen

Das in Deutschland im Vergleich zu Flüssiggas populärere Erdgas⁴¹ gilt als zur Zeit einfachste Alternative, um die Abhängigkeit von Erdöl im Verkehrssektor zu reduzieren. Der Kraftstoff ist nicht günstiger, aber es lastet eine niedrigere Mineralölsteuer auf ihm, sodaß umgerechnet weniger als die Hälfte der Betriebskosten anfallen. Der durchschnittliche Abgabepreis nach Steuer von circa 75 Cent je Liter Erdgas entspricht einem Benzinpreis von 50 Cent und ist damit wesentlich geringer. Und auch gegenüber Diesel ergibt sich ein Preisvorteil. Noch ist der Steuervorteil bis 2020 gesetzlich festgeschrieben (bei Autogas bis 2009). Dem stehen aber höhere Anschaffungs- bzw. Umrüstkosten von ungefähr 2000 bis 3000 EUR und das bereits genannte unzureichende Tankstellennetz mit ungefähr 420 Stationen⁴² gegenüber (Autogas: 650 Stationen.⁴³ In Deutschland sind daher nur ungefähr 25.000 Erdgasfahrzeuge zugelassen, obwohl viele Hersteller ihre Modelle auch mit Gasantrieb anbieten. Zur Erhöhung des Fahrzeugbestands bieten sich lokale oder regionale Flotten in Ballungszentren an. Viele lokale Energieversorgungsunternehmen oder Stadtwerke fördern den Kauf von Erdgasfahrzeugen mit bis zu 2500 EUR [Gassmann 2005; Caveltty 2004]. Nichtsdestoweniger ist das heute ver-

⁴⁰ Fahrzeuge mit Flüssiggas dürfen weder Parkhäuser noch Tiefgaragen benutzen. Erdgasfahrzeugen ist das erlaubt.

⁴¹ In Ländern wie Italien, den Niederlanden oder Großbritannien ist Autogas dagegen beliebter als Erdgas [Göres 2006].

⁴² Stand 2004, bis Ende 2006 sollen mehr als 1000 Zapfanlagen bundesweit in Betrieb sein [Wüst 2004].

⁴³ In den Niederlanden (2100 Stationen), Frankreich (1800 Stationen) und Polen (2400 Stationen) nimmt die Zahl der mit Flüssiggas betriebenen Fahrzeuge erheblich zu [Sturbeck 2005].

fügbare Erdgas genau wie Erdöl eine begrenzte fossile Ressource und fraglich ist, ob sich der teure Aufbau einer Infrastruktur langfristig lohnt [Wüst 2004]. In Japan gibt es im Jahr 2003 etwa 20.000 Erdgasfahrzeuge und 300.000 Fahrzeuge mit LPG-Antrieb (insbesondere Flottenfahrzeuge). An knapp 300 Stationen kann der japanische Kunde Erdgas tanken, für Autogas gibt es 1.900 Stationen (Stand 2003) [Nikkei Weekly 2003; LPG-V Guide 2006].

2.3.9 Zusammenfassung

Durch technische Maßnahmen bei Verbrennungsmotoren wie zum Beispiel durch die Einführung des Dreiwegekatalysators und besserer Kraftstoffe sind die spezifischen Emissionen der Luftschadstoffe Blei, HC, CO, Partikel und NO_x durch den Individualverkehr deutlich gesunken. Dennoch müssen vor allem die von Dieselfahrzeugen ausgestoßenen Stickoxide und Partikel weiter vermindert werden, um die strengen Abgasstandards in Europa, den USA und Japan zu erfüllen. Durch die Verbindung von innermotorischen Maßnahmen und Abgasnachbehandlungstechniken ergeben sich weitere technische Potentiale an Schadstoffminderung. Ansatzpunkte zur Minderung des Kraftstoffverbrauchs- bzw. des CO₂-Ausstoßes liegen in der Verbesserung der spezifischen Motorentechnologie, in einem Betrieb des Motors im optimalen Kennfeld durch Hubraumverkleinerung und Getriebespreizung sowie in einem optimierten Energiemanagement. Trotz unterschiedlicher Eigenschaften des Otto- und Dieselmotors wird sich bei den Motoren eine Annäherung im Brennverfahren ergeben.

Neben Erdgasfahrzeugen und wasserstoffbetriebenen Motoren gewinnen voraussichtlich Hybridantriebe an Bedeutung. Ziel des Hybridantriebs ist es, die jeweiligen Verbrauchsvorteile von Verbrennungsmotoren und Elektromaschinen in unterschiedlichen Betriebszuständen sinnvoll zu kombinieren und insgesamt die Schadstoffemissionen zu mindern. Langfristig wird dem regenerativ erzeugten Wasserstoff in Verbindung mit der Brennstoffzellentechnik ein großes Potential eingeräumt, im Moment besitzt der Antrieb jedoch noch keine technische Marktreife. Erdgas in komprimierter oder verflüssigter Form sowie Autogas erzeugt weniger Luftschadstoffe, bietet jedoch wenig CO₂-Minderungspotential. Zudem gibt es noch keine ausreichende Gasbetankungsinfrastruktur. Bei der Produktion von flüssigen synthetischen Kraftstoffen aus Erdgas erübrigt sich der Ausbau der Infrastruktur, von Nachteil sind jedoch die Energieverluste im Syntheseprozess. Im Ergebnis sind Verbrennungsmotoren noch auf viele Jahre von hoher Bedeutung für den Individualverkehr. Der Hybridantrieb als Brückenfunktion zur Brennstoffzelle bietet sich dabei als Alternative an.

Zur Beurteilung unterschiedlicher Antriebe ist eine Vielzahl an Kriterien heranzuziehen. Die Zuverlässigkeit über die gesamte Gebrauchsdauer von Fahrzeugen setzt der Verbraucher (fast) als selbstverständlich voraus. Entscheidend für die Kundenpräferenz eines neuen Antriebskonzeptes ist die Wirtschaftlichkeit, welche sich einerseits aus den Herstellkosten und andererseits aus den Betriebskosten bestimmt. Die Kosten für Techniken der innermotorischen Optimierung und Abgasnachbehandlung erhöhen den Fahrzeugpreis. Der Kraftstoffverbrauch beeinflusst direkt die Betriebskosten. Der Markterfolg der Techniken hängt somit

nicht zuletzt von den politisch-rechtlichen Rahmenbedingungen ab, die im folgenden Kapitel näher erläutert werden.

2.4 Politisch-rechtliche Rahmenbedingungen

Die Umweltgesetzgebung beeinflusst zunehmend die betrieblichen Planungen, sie greift damit direkt in das Produktportfolio von Unternehmen ein und erhöht so die Entwicklungs- und Produktionskosten. Darüber hinaus wirken länderindividuelle Umweltgesetze zunehmend auf die Gesetze anderer Nationen ein. Daraus folgt, daß sowohl politisch-rechtliche Rahmenbedingungen als auch die Strategien der Unternehmen auf Wechselwirkungen zu untersuchen sind, um den politischen und betrieblichen Entscheidungsträgern Handlungsalternativen an die Hand zu geben.

Abschnitt 2.4.1. gibt einen Überblick über die weltweit geltenden Gesetzgebungen im Verkehrssektor. Abschnitt 2.4.2 setzt sich daran anschließend mit der als Vorreiter geltenden kalifornischen Gesetzgebung auseinander. 2.4.3. erläutert die Bestimmungen der US-Umweltbehörde. Daran anschließend behandelt 2.4.4 Regelungen in der Europäischen Union. Kapitel 2.4.5 schließt mit einer Erläuterung der Gesetzgebung in Japan. Abschnitt 2.4.6 bündelt die Ergebnisse aus den vorangegangenen Kapiteln in einer kurzen Zusammenfassung.

2.4.1 Übersicht

Dem Gesetzgeber stehen unterschiedliche politisch-rechtliche Lenkungsinstrumente zur Verfügung, um Umweltschutzziele zu erreichen. Diese Instrumente werden in Kapitel 3 näher untersucht. Im Gegensatz dazu untersucht der folgende Abschnitt 2.4 die derzeit gültigen Schadstoffgrenzwerte und Prüfverfahren sowie Verbrauchsvorgaben auf strategisch wichtigen Märkten im Automobilsektor. Jeder neu zugelassene Fahrzeugtyp muß die gesetzlichen Bestimmungen einhalten. In den langfristigen Ankündigungen sukzessiver Grenzwertverschärfungen liegt ein wesentlicher Anreiz für die Entwicklung technischer Minderungsmaßnahmen. Die Vorstellungen darüber, was umweltpolitisch geboten ist, gehen weltweit auseinander. Zum einen üben die Industrieländer in Produktnormen oder -auszeichnungen ihre staatlichen Hoheitsrechte unumschränkt aus, zum anderen entwickeln sich Umweltschutzbestimmungen gemeinsam in internationalen Verhandlungen. Infolgedessen ergibt sich ein zum Teil unübersichtliches internationales Regelwerk [Altmann 1997, S. 346ff.].

Im wesentlichen gibt es folgende Abgasgesetzgebungen für zulässige Grenzwerte und Prüfmethoden [Bosch 2002, S. 604, Olson 1999, S. 10f.; EGT 2004]:

- US CARB-Gesetzgebung (California Air Resources Board)
- US EPA-Gesetzgebung (Environmental Protection Agency)
- EU-Gesetzgebung (Europäische Union)
- Japan-Gesetzgebung

Der US-Bundesstaat Kalifornien hat eine Sonderstellung im amerikanischen Umweltrecht. Der Westküstenstaat darf als einziger Bundesstaat seine Abgasgrenzwerte selbst festlegen. Ursache ist, daß Kalifornien im Rahmen des sogenannten ‚Clean Air Act (1970)‘ bereits Schadstoffemissionen reguliert hat, bevor Washington in den 70er Jahren das nationale Luftreinhaltungsgesetz verabschiedete [Olson 1999, S: 237ff.]. Aufgrund der geographischen Lage der kalifornischen Metropolen trägt der Wind die Abgase nicht weiter; sie bleiben vielmehr wie eine Dunstglocke über den Großstädten liegen. Kalifornien übt damit in der Schadstoffgesetzgebung – historisch bedingt – eine internationale Signalwirkung aus.⁴⁴

Andere Staaten haben die obengenannten Grenzwerte und Prüfverfahren in gleicher oder in leicht veränderter Form übernommen (siehe Abbildung 2-10). Die Abgasprüfungen sind Voraussetzung für die Erteilung der allgemeinen Betriebserlaubnis für einen Fahrzeug- und Motortyp. Hierbei muß das Fahrzeug Prüfzyklen unter definierten Randbedingungen fahren und Emissionsgrenzwerte einhalten. Die Prüfzyklen (Testzyklen) sind länderspezifisch festgelegt und können in zwei Typen unterschieden werden [Bosch 2002, S. 604f.]:

- Testzyklus aus Aufzeichnungen tatsächlicher Probefahrten (z.B. Federal Test Procedure in den USA)
- konstruierte (synthetisch erzeugte) Testzyklen aus Abschnitten mit konstanter Beschleunigung und Geschwindigkeit (z.B. MNEFZ in Europa).

Zur Bestimmung des Schadstoffausstoßes wird der durch den Testzyklus genau festgelegte Geschwindigkeitsverlauf „nachgefahren“. Während der Fahrt wird das Abgas gesammelt und nach dem Ende des Fahrprogramms hinsichtlich der Schadstoffmassen analysiert [Bosch 2002, S. 605f.]. Die in den Verfahren zur Überprüfung der Abgaswerte von PKW verwendeten Testzyklen entsprechen jedoch nicht genau dem realen Fahrbetrieb. Abgasuntersuchungen an bereits in Gebrauch befindlichen Fahrzeugen (Feldüberwachung) haben gezeigt, daß es im realen Fahrbetrieb zum Teil erhebliche Überschreitungen gibt (off-cycle-emissions) [SRU 2005, S. 160; VTT 2000a].

Die Hersteller in den Industrieländern fordern aus Wettbewerbsgründen verstärkt eine Angleichung der Abgasbestimmungen und auch das politisch-administrative System der hochentwickelten Staaten setzt sich wiederholt für eine Harmonisierung der (eigenen) Normen ein. Schwellenländer fürchten indes strengere Abgasstandards. Nichtsdestoweniger folgen die schnell wachsenden Märkte Asiens, allen voran China, schrittweise der Abgasgesetzgebung und den Verbrauchszielen der Industriestaaten und setzen damit die Hersteller auch auf wichtigen Absatzmärkten umweltpolitisch unter Druck [AW Knowledge 2005b, Ball 2004, Wona-

⁴⁴ Anm.: New York, Massachusetts, Vermont, Maine setzen die kalifornische Abgasgesetzgebung ein und Rhode Island, Connecticut und New Jersey beabsichtigen die Grenzwerte einzuführen. Diese sieben US-Bundesstaaten umfassten zusammen mit Kalifornien 26 Prozent des US-amerikanischen Automobilmarktes [Point Carbon 2004; Elseworth 2004]. Die EU diskutiert zudem, inwieweit die in Kalifornien verbreitete Technologie als Richtwert für EURO V dienen kann [Braess und Seiffert 2003, S. 10ff.].

cott 2004 ACEA 2002b, DUH 2005a, Zhang 2005, EST 2003].⁴⁵ Abbildung 2-10 zeigt die Geltungsbereiche der verschiedenen Abgasgesetzgebungen.

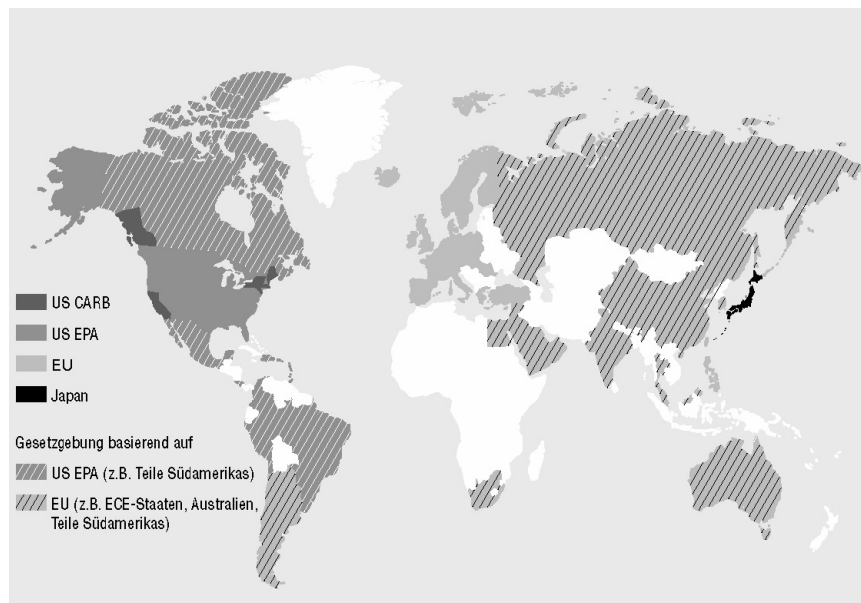


Abbildung 2-11: Geltungsbereiche der verschiedenen Abgasgesetzgebungen [Bosch 2006]

Die folgenden Abschnitte erläutern die wesentlichen Abgasgesetzgebungen US-CARB, US-EPA, EU und Japan.

2.4.2 CARB-Gesetzgebung

Die Grenzwerte der kalifornischen Abgasgesetzgebung CARB (California Air Resources Board) für PKW und leichte Nutzfahrzeuge (Light Duty Trucks, LDT) sind in den Abgasnormen LEV I (1994 bis 2003) und LEV II (ab Modelljahr 2004) vereinheitlicht und Vorreiter in der weltweiten Abgasgesetzgebung. Die CARB-Gesetzgebung legt unter anderem Grenzwerte für Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO_x), NMOG (Nicht-Methanhaltige organische Gase) und Partikelemissionen fest. Die Schadstoffemissionen werden im Fahrzyklus FTP 75 (Federal Test Procedure) ermittelt.⁴⁶ Die Grenzwerte sind auf die Fahrstrecke bezogen und in Gramm pro Meile festgelegt. Die Fahrzeuge unterteilen sich nach ihren Emissionswerten in folgende Abgaskategorien [Bosch 2002, S. 606]:

- Tier 1
- TLEV (Transitional Low Emission Vehicle),
- LEV (Low-Emission-Vehicle),

⁴⁵ Die festgesetzten Verbrauchswerte in China errechnen sich, ähnlich wie in Japan, aus dem Verhältnis Fahrzeuggewicht und Verbrauch. Sie gelten seit Juli 2005 für alle neu zugelassenen Fahrzeuge. In den USA dagegen wird vom Flottenverbrauch ausgegangen (siehe CAFE-Gesetzgebung) [Volk 2005; Lee und Wonacott 2004].

⁴⁶ Die USA-Testzyklen werden im folgenden nicht näher untersucht [siehe Bosch 2002, S. 618f.].

- ULEV (Ultra-Low-Emission-Vehicle),
- SULEV (Super-Low-Emission-Vehicle),
- ZEV (Zero-Emission Vehicle, d.h. Fahrzeuge ohne Abgas- und Verdunstungsemissionen)
- PZEV (Partial ZEV, SULEV mit höheren Anforderungen bei Verdunstungsemissionen und Dauerhaltbarkeit).

Für LEV I sind die Kategorien Tier 1, TLEV, LEV und ULEV bestimmend. Seit 2004 gilt die Abgasnorm LEV II. Die Kategorien Tier 1 und TLEV entfallen und es kommt SULEV mit deutlich niedrigeren Grenzwerten hinzu. Die Kategorien LEV und ULEV bleiben bestehen. Der Hersteller muß für die Zulassung eines Fahrzeugtyps nachweisen, daß die Schadstoffemissionen die Grenzwerte über 100.000 Meilen (LEV I) bzw. 120.000 Meilen (LEV II) oder 10 Jahre („full useful life“) nicht überschreiten. Für Fahrzeuge der Kategorie PZEV gelten 150.000 km oder 15 Jahre. Ab 2007 müssen alle Fahrzeuge nach der LEV II-Norm zertifiziert sein [Bosch 2002, S. 607].

Jeder Hersteller muß die Voraussetzung dafür schaffen, daß seine Fahrzeuge im Flottendurchschnitt einen bestimmten Grenzwert für die Abgasemissionen einhalten. Das vom Sommermog belastete Kalifornien sowie einige umweltbewußte Ostküstenstaaten beabsichtigen, ab 2007 nur die Hälfte des ohnehin strengen US-Grenzwertes für NO_x von 0,08 g/km zuzulassen. Um diese Ziele zu erreichen, sollen ab 2006 weitere Verbesserung der schwefelhaltigen Kraftstoffe (<15ppm) erfolgen. Trotzdem stehen insbesondere die Hersteller von Dieselmotoren vor umfangreichen technischen Herausforderungen. Nach derzeitigem Stand der Technik sind die Grenzwerte nur mit De NO_x -Systemen basierend aus SCR (Harnstoff)⁴⁷ oder katalytischer Speicher-Kat-Technologie zu erfüllen (siehe 2.3.2.3) [Bosch 2002, S. 607, Markus 2004; Polk Marketing Systems 2005; Daisho 2003, S. 10]. Der Flottendurchschnitt ergibt sich aus dem Mittelwert der NMOG-Emissionen von allen angebotenen Fahrzeugen eines Herstellers. Die Grenzwerte werden jedes Jahr herabgesetzt, sodaß der Hersteller immer mehr Fahrzeuge der sauberen Abgaskategorien herstellen muß.

Der US-Gesetzgeber schreibt dem Hersteller zudem vor, wieviel Kraftstoff seine – verkaufsgewichtete – Fahrzeugflotte im Mittel verbrauchen darf, beziehungsweise wie viele Meilen mit einer Gallone Kraftstoff gefahren werden können. Dieser auch in Kalifornien geltende CAFE-Wert (Corporate Average Fuel Economy), hat sich seit Einführung im Jahre 1977 nur wenig verändert und liegt gegenwärtig für PKW bei 27,5 Meilen/ Gallone.⁴⁸ Das entspricht einem Verbrauch von 8,55 l/100km (201 gCO₂/km).⁴⁹ Bei leichten Nutzfahrzeugen liegt der Wert bei 21,6 Meilen pro Gallone. Überschreitet der Hersteller den Grenzwert, muß eine Stra-

⁴⁷ Im Nutzfahrzeugbereich ist diese Technik bereits serienreif [Polk Marketing Systems 2005].

⁴⁸ Eine Meile = 1,61 km, 1 Gallone = 4,56 Liter

⁴⁹ Stand 2005 [VWoA 2005]

fe an den Staat abgeführt werden. Die Sanktion beträgt fahrzeugbezogen derzeit 5,50\$ pro einem Zehntel ‚mpg‘-Überschreitung. Für sogenannte „gasguzzlers“ (Spritsäufer) bezahlt der Käufer zudem eine besondere Strafsteuer. Der Grenzwert liegt bei 20,7 Meilen pro Gallone (ab 2007 22,2mpg), was 10,45l/100km entspricht [NHTSA 2003a; NHTSA 2003b; Bosch 2002, S. 607; WRI 2005].⁵⁰ Ab 2011 will die Nationale Verkehrssicherheitsbehörde NHTSA (National Traffic Safety Administration) den Durchschnittsverbrauch nach Verkehrsfläche in Quadratmetern, der Grundfläche zwischen Radstand und Spurweite, klassifizieren. Neben der Minderung des Verbrauchs und damit einhergehend der Kohlendioxidemissionen zielt die obengenannte CAFE-Gesetzgebung insbesondere auf eine Verringerung der Ressourcenabhängigkeit. Wegen der instabilen politischen Lage in bestimmten Förderregionen, stehen die CAFE-Standards weiter auf dem Prüfstand [Wirsig 2005, S. 16; Hakim 2004a; Hakim 2004b].

In Kalifornien liegt der Anteil des Straßenverkehrs am CO₂-Ausstoß bei 60 Prozent. Aus diesem Grund beabsichtigt das California Air Resource Board mit dem Gesetz AB1493 von 2002 mittelfristig (2012 bis 2016), das an den Kraftstoffverbrauch gekoppelte Kohlendioxid als Schadstoff zu erfassen und eine Reduzierung um 30 Prozent innerhalb von zehn Jahren zu erreichen. Weitere US-Bundesstaaten beabsichtigen, den Plänen des California Air Resources Board zu folgen. Nach dem geplanten Gesetz darf die Fahrzeugflotte der Hersteller im Jahr 2009 im Durchschnitt noch 8,4 l/100km (200 gCO₂/km) verbrauchen. Ab 2016 sind für Neufahrzeuge 5,3 l/100km bzw. 127 gCO₂/km festgelegt [Hakim 2004a; Hakim 2004b; Elseworth 2004, Geanacopoulos 2005].⁵¹ Zur Erreichung dieses Ziels müssen die Hersteller einerseits ab 2008 mindestens ein Hybridfahrzeug in der Modellpalette anbieten. Andererseits dürfen die Hersteller verbrauchsgünstige Dieselfahrzeuge seit 2004 in Kalifornien nicht mehr verkaufen, weil die Motoren wegen der schlechten Dieselmotorkraftstoffqualität die LEV II-Abgasnormen nicht erfüllen [Eckhardt 2004].⁵²

Neue Impulse für die Entwicklung von Elektrofahrzeugen gehen von der „ZEV-Gesetzgebung“ Kaliforniens aus. In der ersten Fassung von 1990 forderte das Gesetz emissi-

⁵⁰ Der US-Kongreß erläßt 1975 den sogenannten „Energy Policy Conservation Act“ mit Titel V „Improving Automotive Efficiency“ und CAFE-Standards für PKW und leichte Nutzfahrzeuge. Das Gesetz wurde als Reaktion auf das arabische Ölembargo 1973 bis 1974 eingeführt [NHTSA 2003a].

⁵¹ Die im US-amerikanischen Herstellerverband ‚Alliance of Automobile Manufacturers (AAM)‘ organisierten Unternehmen sprechen sich mit Blick auf die Kosten für die – von der US-Umweltbehörde ‚Environmental Protection Agency (EPA)‘ festgelegten – einheitlichen Verbrauchsnormen aus und begegnen dem geplanten Gesetz mit Klagen und Werbekampagnen (Stand 2004) [Welch and Kerwin 2004; Ball und Fialka 2004; Hakim 2004a; Hakim 2004b]. Die Klage wurde im Dezember 2004 eingereicht, befindet sich noch in der Vorbereitungsphase und ist noch nicht entschieden. Der Rechtsstreit dauert ungefähr drei bis vier Jahre [Geanacopoulos 2005; Rosenkranz 2005].

⁵² Ab 2006 soll es in den USA Kraftstoff mit weniger Schwefelanteil geben [Eckhardt 2004].

onsfreie Fahrzeuge ab 1998. Technisch ist dies nur erreichbar mit batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeugen oder mit Brennstoffzellenfahrzeugen. In den Folgejahren wurde dieses Gesetz mehrmals geändert und ist weiterhin in der Diskussion. In der letzten Fassung von 2001 werden neben reinen ZEV-Fahrzeugen auch andere Fahrzeuge der Kategorie PZEV (Partial ZEV) zugelassen. Zu dieser Kategorie gehören auch die sogenannten AT PZEVs. Diese „Advanced Technology PZEVs“ haben die gleichen niedrigen Emissionen wie die PZEVs und zusätzlich einen Elektroantrieb. In der Praxis handelt es sich meist um schadstoffarme Hybridfahrzeuge. Je nach Marktanteil des Herstellers in Kalifornien sieht das Gesetz unterschiedliche Prozentsätze vor. Ab 2003 sollen die Volumenhersteller 10 Prozent der Neuzulassungen der Abgaskategorie ZEV (Zero-Emission Vehicle) bzw. ZEV-äquivalente Fahrzeuge zugeordnet werden. Bis 2016 soll der Anteil auf 16 Prozent steigen [Bosch 2002, S. 606ff.; Braess und Seifert 2003, S. 123]. Das California Air Resources Board gewichtet diese Fahrzeuge je nach Emissionsminderungsaufwand mit einem Faktor 0,2...1 [Bosch 2002, S. 609].

2.4.3 EPA-Gesetzgebung

Die Gesetzgebung der Environmental Protection Agency (EPA) gilt für die (restlichen) US-Bundesstaaten und ist weniger streng als die von CARB. Den US-Bundesstaaten ist freigestellt, die CARB-Gesetzgebung anzuwenden. Grundlage ist ein Gesetz, welches viele Maßnahmen zum Schutz der Umwelt vorsieht, aber keine Grenzwerte bestimmt („Clean Air Act“). Nach der Abgaskategorie Tier 1 gilt seit 2004 die Norm „Tier 2“. Die EPA-Gesetzgebung legt wie CARB Grenzwerte für Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO_x), NMOG (Nicht-Methanhaltige organische Gase) und Partikelemissionen fest. Die Schadstoffemissionen werden wie CARB im Fahrzyklus FTP 75 (Federal Test Procedure) ermittelt. Die Grenzwerte sind auf die Fahrstrecke bezogen und in Gramm pro Meile festgelegt. Bei Tier 2 gelten für Fahrzeuge mit Otto- und Dieselmotor die gleichen Abgasgrenzwerte. Die EPA gliedert für Tier 2 die Grenzwerte in 10 Emissionsstandards (bin). Ab 2007 dürfen nur noch Fahrzeuge nach Tier 2 zugelassen werden. Beim Flottendurchschnitt eines Herstellers legt die US-Umweltbehörde die NO_x-Emissionen zugrunde und unterscheidet sich damit vom CARB, welches die NMOG-Emissionen heranzieht. Beim Flottenverbrauch gelten die CAFE-Standards. Die für die CAFE-Standards zuständige bundesstaatliche ‚National Highway Traffic Safety Administration‘ legt im April 2006 eine Reform der Verbrauchsnormen vor. Nach einer Übergangsperiode von 2008 bis 2010 sollen die Standards in 2011 eingeführt werden [Bosch 2002, S. 609f.; Geanacopoulos 2005]. Wie in der CO₂-Regulierung mit dem Gesetz AB1493 könnte die EPA auch die Festlegung der Schadstoffgrenzwerte schrittweise an den Vorreiter Kalifornien verlieren [Geanacopoulos 2005].

2.4.4 EU-Gesetzgebung

Die Richtlinien der europäischen Abgasgesetzgebung werden von der EU-Kommission festgelegt. Die ersten europäischen Abgasgrenzwerte für PKW wurden 1970 mit der Richtlinie

70/220/EWG für Kohlenwasserstoffe (HC) und Kohlenmonoxid (CO) eingeführt. 1977 traten mit ECE R15/02 Grenzwerte für NO_x (10-16g/Test⁵³ oder 3g/km) und ab 1.10.1988 nach ECE R83 Grenzwerte für Partikel (1,1g/Test) in Kraft. Die Grenzwerte wurden stufenweise um bis zu 90 Prozent abgesenkt. Die Abgasgrenzwerte für PKW sind in folgenden Abgasnormen enthalten [Bosch 2002, S. 611; Afflerbach 2006; SRU 2005]:

- ECE R15/00 (ab 1972) bis ECE R15/04 (ab 1982)
- EU-1 (ab 1. Juli 1992)⁵⁴,
- EU-2 (ab 1. Januar 1996)⁵⁵,
- EU-3 (ab 1. Januar 2000)⁵⁶,
- EU-4 (seit 1. Januar 2005)⁵⁷,
- EU-5 (von 2010 an).

Eine neue Abgasnorm wird üblicherweise in zwei Schritten eingeführt. In der ersten Stufe müssen neu zertifizierte Fahrzeugtypen die neu definierten Abgasgrenzwerte einhalten (TA, type approval, Typzertifizierung). In der zweiten Stufe nach einem Jahr muß jedes neu zugelassene Fahrzeug die neuen Grenzwerte einhalten (FR, first registration, Erstzulassung). Mit Einführung der Stufe EU-3 gelten in den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union nicht mehr die nationalen Abgasnormen, sondern nur noch die EU-Richtlinien. Die zulässigen Grenzwerte beziehen sich auf die zurückgelegte Fahrstrecke gemessen in Gramm pro Kilometer (g/km). Die Schadstoffemissionen werden mit EU-3 im Fahrzyklus MNEFZ (Modifizierter Neuer Europäischer Fahrzyklus) berechnet [Bosch 2002, S. 611].⁵⁸

Wie in Tabelle 2-4 angegeben, ist die Summe der Werte für Kohlenwasserstoffe (HC) und Stickoxide (NO_x) in EU-3 nicht mehr ausgewiesen, sondern getrennt ermittelt. Der CO-Wert liegt bei Ottomotoren für EU-3 etwas höher als für EU-2, da ein modifizierter Typzyklus den Startvorgang des Motors einbezieht. In EU-1 und EU-2 setzt die Messung erst nach einem Vorlauf von 40 Sekunden ein. In der Phase des Startvorgangs sind die Emissionen jedoch besonders hoch, sodaß die Grenzwerte für EU-2 und EU-3 nicht vergleichbar sind. Die

⁵³ Anm.: In Abhängigkeit vom Bezugsgewicht

⁵⁴ EU-Richtlinie 91/441/EWG

⁵⁵ EU-Richtlinie 1994/12/EWG

⁵⁶ EU-Richtlinie 1998/69/EG

⁵⁷ EU-Richtlinie 1998/69/EG

⁵⁸ Die in den vorgeschriebenen Verfahren zur Überprüfung der Abgaswerte verwendeten Testzyklen entsprechen nicht genau dem realen Fahrbetrieb, was zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Emissionen führt (off-cycle emissions). Aus diesen Erfahrungen heraus wurden für die EU-Normen ab 2000 verbesserte Testzyklen definiert und Feldüberwachungen (In-Use-Compliance, IUC) festgelegt. Zudem wird die On-Board-Diagnostik (OBD) weiterentwickelt, um die dauerhaft Einhaltung der Emissionsstandards überprüfen zu können [SRU 2005, S. 160].

Grenzwerte für Otto- und Dieselfahrzeuge sind unterschiedlich. Die EU-Kommission plant jedoch eine Harmonisierung der Grenzwerte [Bosch 2002, S. 611f.; UBA 2003c].⁵⁹

Tabelle 2-4: Schadstoffgrenzwerte von PKW in der Europäischen Union [UBA 2003c; 2003e]⁶⁰

Pkw	Schadstoff in g/km	EURO 1 ab 1992/1993 (T) 91/441/EWG 1992	EURO 1 ab 1992/1993 (S) 91/441/EWG 1992	EURO 2 ab 1996/1997 (T/S) 94/12/EG 1996	EURO 3 ab 2000/01 (T/S) 98/69/EG 2000	EURO 4 ab 2005/06 (T/S) 98/69/EG 2005	EURO 5 vorauss. ab 2010 UBA Vorschlag 2010
Richtlinie							
Benzin	CO	2,72	3,16	2,2	2,3	1	1
	HC+NOx	0,97	1,13	0,5	0,35	0,18	0,13
	HC	-	-	-	0,2	0,1	0,05
	NOx	-	-	-	0,15	0,08	0,08
	Partikel	-	-	-	-	-	0,0025
Diesel	CO	2,72	3,16	1	0,64	0,5	1
	HC+NOx	0,97	1,13	0,7	0,56	0,3	0,13
	HC	-	-	-	0,06	0,05	0,05
	NOx	-	-	-	0,5	0,25	0,08
	Partikel	0,14	0,18	0,08	0,05	0,025	0,0025

Ab EURO 3 nicht mehr ausgewiesen.

Für die seit 2005 geltende EU-4 bei Partikelemissionen durch Diesel reichen innermotorische Maßnahmen und weiterentwickelte Brennverfahren der Hersteller für kleinere und mittlere Fahrzeuge aus. Der öffentliche Druck von Umweltverbänden und Verbrauchern fordert jedoch eine weitergehende Schadstoffminderung mit dem Partikelfilter. Der vom Umweltbundesamt (UBA) vorgeschlagene Partikelgrenzwert von 0,0025 g/km für EU-5 ist nur mit Partikelfilter zu erfüllen. Bei EU-4 sind NO_x-Emissionen für Diesel von 0,25 g/km erlaubt – die dreifache Menge im Vergleich zum Benzinmotor. Die geplante Verschärfung von EU-5 liegt unter dem geplanten Grenzwert in den USA und ist mit dem gegenwärtigen Stand der Technik (z.B. Abgasrückführung, AGR) kaum noch zu erreichen. Vielmehr ist ein Minderungsziel von unter 200 mg/km (mittelfristig) nur mit aufwendigeren Techniken zu erfüllen (siehe Abschnitt 2.2.2.3: Abgasnachbehandlung). Für die EU-5 Grenzwerte wird ein Einführungszeitpunkt von 2008 bis 2010 diskutiert [SRU 2005, S. 157; Bosch 2002, S. 613, Schäfer 2005a].

Neben der Begrenzung der Schadstoffemissionen im Abgas gibt es neue Kraftstoffstandards. Die Richtlinie 1998/70/EG definiert den Schwefelgehalt ab 2005 auf 50ppm⁶¹ bei Otto- und Dieselmotoren. Im Zeitraum 2005 bis 2009 führt die EU Grenzwerte für eine verbesserte

⁵⁹ Mit der Einführung der Direkteinspritzung auch bei Ottomotoren nähern sich die Brennverfahren der Otto- und Dieselmotoren (Homogenous Charge Compression Ignition, HCCI) bereits deutlich an. Die nächsten Stufen der Entwicklung beruhen auf neuen Kraftstoffen und verstärken diesen Trend (Volkswagen: CCS-Combined Combustion System) [Automobilproduktion 2007, S. 72; Volkswagen 2003, Sherman 2004].

⁶⁰ EURO 5 soll voraussichtlich ab 2010 gelten. Die Deutsche Umwelthilfe (DUH) setzt sich für eine Einführung in 2006 ein [Rosenkranz 2005].

⁶¹ parts per million (ppm): Bezeichnung zur Angabe des Anteils einer Substanz in 1.000.000 Teilen der Gesamtsubstanz.

Kraftstoffqualität mit höchstens 10ppm (schwefelfrei) ein. In Deutschland ist schwefelfreie Kraftstoffqualität bereits seit 2003 flächendeckend verfügbar [UBA 2003c].

Die Zulassung eines Fahrzeugtyps verläuft schließlich vergleichbar wie in den USA. Die Schadstoffe HC, CO, NO_x und Partikel werden gemessen. Die auf das Testergebnis anzuwendenden Verschlechterungsfaktoren sind für jede Schadstoffkomponente gesetzlich vorgegeben.⁶² Die geprüften Fahrzeuge müssen die festgelegten Grenzwerte für eine Laufleistung von 80.000 km (EU-3) beziehungsweise 100.000 km (EU-4) oder 5 Jahre einhalten [Bosch 2002, S. 613].

Bei den CO₂-Emissionen gibt es keine gesetzlich festgelegten Grenzwerte. Die EU hat sich aber nach dem Prinzip des Lastenausgleichs (burden sharing) ein Minderungsziel von acht Prozent von 2008 bis 2012 auf der Basis von 1990 gesetzt. Die europäische Strategie für die CO₂-Reduktion im Verkehr beruht auf insgesamt drei Säulen. Die im europäischen Herstellerverband ‚Association des Constructeurs Européens d’Automobiles (ACEA⁶³)‘ organisierten Unternehmen verpflichten sich auf eine freiwillige Selbstvereinbarung (siehe Abbildung 2-11). Unter der Voraussetzung eines Dieselanteils von 30 Prozent, hoher Kraftstoffqualität, gleicher Verpflichtungen für die in japanischen und koreanischen Verbänden organisierten Wettbewerber⁶⁴ und Verzicht auf ordnungspolitische Instrumente soll der CO₂-Ausstoß bis zum Jahr 2008 (ACEA) bzw. 2009 (JAMA und KAMA) durchschnittlich 140 g/km (5,8l/100km) betragen – bisher allerdings ohne ‚konkret vereinbarte‘ Pläne zur Sanktionierung im Falle der Zielverfehlung. Die EU plant dabei – (voraussichtlich) nach Fahrzeuggröße (Hubraum) gestaffelte – feste CO₂-Grenzwerte auf 120g pro Kilometer bis 2012.⁶⁵ Um die Entwicklungen zu überprüfen, vereinbarten die EU-Kommission und ACEA eine regelmäßige Umweltüberwachung [SRU 2005, S. 170f., S. 195; DLR 2002, S. 58; VDA 2005b, S. 129ff.].

⁶² Alternativ kann der Hersteller kleinere Faktoren in einem spezifizierten Dauerlauf über 100.000 km (EU 4) nachweisen.

⁶³ ACEA (Association des Constructeurs Européens d’Automobiles): BMW AG, DaimlerChrysler AG, Fiat S. p. A., Ford Europe Inc. General Motors Europe AG, Porsche AG, PSA Peugeot Citroën, Renault SA, AB Volvo und Volkswagen AG [ACEA].

⁶⁴ JAMA (Japan Automobile Manufacturers Association): Daihatsu Motor Corporation Ltd.; Fuji Heavy Industries Ltd. (Subaru), Honda Motor Corporation Ltd.; Isuzu Motors Ltd., Mazda Motors Corporation, Nissan Motor Corporation Ltd., Mitsubishi Corporation, Suzuki Motor Corporation und Toyota Motor Corporation [JAMA].

KAMA (Korean Automobile Manufacturers Association): Daewoo Motor Co. Ltd., Hyundai Motor Company und Kia Motors Corporation [KAMA].

⁶⁵ Die EU-Strategie zielt auf einen Neufahrzeugflotten-Emissionsmittelwert von 120 g/km in 2005, spätestens in 2010. Das entspricht einer Reduktion von 35 Prozent gegenüber dem Stand von 1995 [Schäfer 2005b].

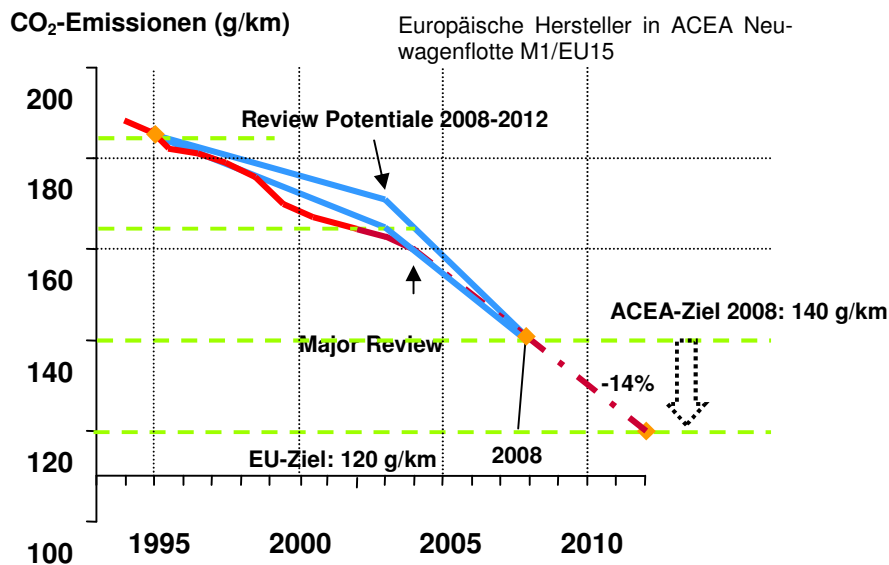


Abbildung 2-12: ACEA-Selbstverpflichtung von 140 gCO₂/km [UBA 2003c, UBA 2003e]

Ein Richtlinienentwurf der EU von Juni 2005 sieht zudem vor, die in vielen EU-Staaten erhobene zulassungs- bzw. hubraumbezogene Kfz-Steuer zugunsten einer umwelt- und verbrauchsorientierten Steuer zu ersetzen, bei deren Berechnung der Kohlendioxidausstoß maßgebend ist (siehe 3.3.4.3) [Polk Marketing Systems 2005]. Schließlich gibt es seit dem 1. November 2004 noch die EU-Richtlinie von 1999 zur Verbrauchskennzeichnung (Labelling) neuer Pkw⁶⁶, um dem Verbraucher genaue Informationen über die Kraftstoffeffizienz und CO₂-Emissionen von Neufahrzeugen zu geben; eine Verpflichtung zur Schadstoffkennzeichnung ist in der Planung [DUH 2005b; Wokaun et al. 2005; BFE 2005].

Der auch als Europäische Fahrzyklus bezeichnete EU-/ECE-Testzyklus (Economic Commission of Europe) simuliert Fahrten im inner- (UDC urban driving cycle) und mit bis zu 120 km/h im außerstädtischen (EUDC extra urban driving cycle) Verkehr und wird seit 1996 auch als NEFZ (neuer europäischer Fahrzyklus) oder NEDC (new european driving cycle) bezeichnet. Mit EU-3 entfällt der Startvorgang bis zum Beginn der Abgasmessung (MNEFZ modifizierter NEFZ), sodaß die Messung auch Kaltstarts erfaßt [Bosch 2002, S. 620; SRU 2005, S. 161]. Die Bedeutung der EU-Grenzwerte zeigt sich auch darin, daß der sich dynamisch entwickelnde Markt in China schrittweise der Abgasgesetzgebung und den Verbrauchszielen der EU folgt. Ab 1. Juli 2007 müssen die neuen PKW-Modelle EU 3 erfüllen, ab 1. Juli 2010 wird EU 4 in China für neue Fahrzeuge landesweit eingeführt. Für im Bestand befindliche Fahrzeuge verschiebt sich die Implementierung um ein Jahr [Zhang 2005; AW Knowledge 2005b].

⁶⁶ Deutsche Implementierung als "Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung" seit 1.11.2004 [Deutsche Energie Agentur 2006].

2.4.5 Japan-Gesetzgebung

Die japanische Gesetzgebung legt Grenzwerte für Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO_x), Kohlenwasserstoffe (HC), Partikel und Rauch fest. Die Schadstoffemissionen werden im 10-15-mode Testverfahren (Otto- und Dieselmotoren) sowie mit dem 11-mode Test (nur Fahrzeuge mit Ottomotor) ermittelt.⁶⁷ Eine Modifizierung des 10-15-mode Tests mit Kaltstarts ist in 2005 erfolgt [Bosch 2003, S. 562; Tokyo Metropolitan Government 2003, S. 1ff.; JAMA 2005a, S. 48].

Der 11-mode Test wird nach dem Kaltstart viermal durchfahren, wobei alle vier Zyklen bewertet werden. Der 10-15-mode Test wird nur als Heißstart durchfahren und simuliert das charakteristische Fahrverhalten in Tokio, ergänzt um einen Hochgeschwindigkeitsanteil. Die Höchstgeschwindigkeit ist jedoch mit 70 km/h niedriger als beim europäischen Testverfahren, da in Japan aufgrund der höheren Verkehrsdichte in der Regel mit niedrigeren Geschwindigkeiten gefahren wird [Bosch 2002, S. 621]. Beim 10-15-mode Test durchläuft das Testfahrzeug vier Fahrzyklen. Die ersten drei Fahrzyklen bestehen jeweils aus 10 Fahrweisen im Stadtverkehr, wie zum Beispiel Beschleunigung, Abbremsen und Fahren bei konstanter Geschwindigkeit. Dabei wird eine maximale Geschwindigkeit von 40 km/h erreicht. Im vierten Fahrzyklus wird eine beschleunigte Fahrweise auf dem Highway simuliert. Das Fahrzeug durchläuft 15 von den oben beschriebenen Fahrweisen mit einer Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h. Das gesamte Testverfahren dauert 11 Minuten [JAMA 2004a, S. 64].

Die seit 2000 gültigen Emissionsgrenzwerte für Otto- und Dieselmotoren und die Modifizierung in 2005 sind in der Tabelle 2-5 und dargestellt.

Tabelle 2-5: Emissionsgrenzwerte von PKW in Japan [JAMA 2005a, S. 48; JAMA 2004a, S. 60]⁶⁸

Jahr	Fahrzeugtyp	Emissionsgrenzwerte (g/km)			
		CO	HC	NO _x	PM
2000	Benzin	0,67	0,08	0,08	-
	Diesel	2,1	0,4	0,4	0,08
2005	Benzin	1,15	0,05	0,05	-
	Diesel	0,63	0,024	0,14	0,013

Die neuen Grenzwerte werden ab 2005 nicht mehr nach 10-15 und 11-mode Test unterteilt, sondern nach einem Schlüssel ($11\text{-mode} \cdot 0,12 + 10\text{-15-mode} \cdot 0,88$) [JAMA 2005a, S. 48; Bosch 2003, S. 562; Daisho 2003, S. 9]. Infolgedessen sind auch die Emissionsgrenzwerte für CO im Jahr 2005 weniger streng als die im Jahr 2000 festgelegten Standards. Weitere Verschärfungen sind jedoch für 2007 geplant [ACEA 2004d]. In den Ballungszentren Japans gibt es lokale Luftqualitätsrichtlinien (z.B. NO_x-Control-Law). So darf der japanische Kunde in Ballungsräumen – bereits im Fahrzeugbestand befindliche – Dieselfahrzeuge noch nicht ein-

⁶⁷ Aufgrund der unüblichen Einheit g/Test für die Emissionsberechnung beim 11-mode Test, steht im folgenden der 10-15-mode Test im Mittelpunkt der Betrachtung.

⁶⁸ Datei: [Japan Emissionsstandards](#)

mal anmelden, wenn diese die strengen lokalen Schadstoffvorgaben (0,48 g/km NO_x, 0,055 g/km PM) nicht einhalten [VTT 2000a; MOE 2003, S. 2ff.].

Mit der Ratifizierung des Kyoto-Protokolls verpflichtet sich Japan 2002 zur Reduzierung der CO₂-Emissionen um 6 Prozent im Korridor von 2008 bis 2012 auf Basis des Referenzjahres 1990. Das Minderungsziel des sogenannten ‚Kyoto Protocol Target Achievement Plan‘ für den Verkehrssektor liegt bei 250 Millionen Tonnen CO₂ bis 2010 – 17 Prozent über dem Wert von 1990, aber im Vergleich zum Referenzwert in 2010 eine absolute Reduktion von 45 Millionen Tonnen. Ohne zusätzliche Maßnahmen erhöht sich der CO₂-Ausstoß um 7 Prozent im Vergleich zum Basisjahr 1990 (siehe Tabelle 2.6) [ACEA 2005a; ACEA 2004c; VTT MTN 2004b; Point Carbon 2005].

Tabelle 2-6: CO₂-Minderungsziele in Japan [ACEA 2005a]⁶⁹

Sektor	Emissionen im Basisjahr 1990	Emissionen in 2002	Zielwert für 2010	Aussicht für 2010 ohne zusätzliche Maßnahmen
Industrie	476	468	435	450
Haushalte	273	363	302	333
Verkehr	217	261	250	259
Kraftwerke	82	82	69	73

Der Verkehrssektor hat einen Anteil von 20 Prozent an den gesamten CO₂-Emissionen, wovon 90 Prozent auf den Straßenverkehr zurückzuführen sind – mit steigender Tendenz. Die CO₂-Emissionen von PKW sind gegenüber 1990 um 52 Prozent gestiegen. Die Steigerung ist auf den erhöhten Fahrzeugbestand und das höhere Fahrzeuggewicht zurückzuführen, sodaß die Verbesserungen bei Kraftstoffeffizienz und geringerer Fahrleistung (bis 1998) egalisiert werden [JAMA 2003b, S. 12f.; VTT 2003a; ACEA 2005c; ACEA 2004e].

In einem ersten Schritt gibt die japanische Regierung (NEDO)⁷⁰ das Ziel vor, die CO₂-Emissionen auf das Niveau von 1995 zu verringern. Zur Erreichung dieses Ziels wurde die Einführung strengerer Kraftstoffverbrauchswerte für das Jahr 2010 beschlossen. Für Ottomotoren sollen die Hersteller eine Verbesserung der Kraftstoffeffizienz um durchschnittlich 22,8 Prozent erzielen (bis zu 125 gCO₂/km). Mit dieser Maßnahme sollen 16,5 Millionen Tonnen CO₂ vermieden werden [VTT 2003a; ACEA 2004c].

Den 1998 eingeführten Top-Runner-Ansatz mit der Orientierung des Flottenverbrauchs am jeweils energieeffizientesten Fahrzeug der Gewichtsklasse (siehe Tabelle 2-7) erreichen die Hersteller vor dem Zieljahr 2010. Siebzig Prozent der von japanischen Herstellern produzierten PKW haben das Ziel bereits im Jahr 2002 erreicht, sodaß das Industrieministerium METI (Ministry of Economy, Trade and Industry), das Umweltministerium MOE (Ministry of Envi-

⁶⁹ Anm.: Untersuchungen der japanischen Regierung (Taiko: General Policy) prognostizieren für den Verkehrssektor eine CO₂-Steigerung auf 295 Millionen Tonnen von einem Basiswert im Jahre 1990 von 212 Millionen Tonnen.

⁷⁰ NEDO: New Energy and Industrial Technology Development Organization

ronment) und das Transportministerium MLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) eine Überprüfung der Standards vornehmen [JAMA 2003b, S. 12f.; VTT 2003a; ACEA 2005c; ACEA 2004e].⁷¹ So erwägt das Industrieministerium, das neue Verbrauchsziel für die Phase nach 2010 bereits in 2006 einzuführen [METI 2004; METI o. J.; ACEA 2004b; Tanaka 2003, S. 93ff.].

Tabelle 2-7: Voraussetzung für PKW in km/l nach Top-Runner-Ansatz [ECCJ 2005, S. 28]

Fahrzeugkategorie (nach Gewicht)	Kraftstoffeffizienz		
	Benzin	Diesel	Autogas
<703kg	21,2	18,9*	15,9
703 bis 828kg	18,8	18,9*	14,1
828 bis 1.016kg	17,9	18,9*	13,5
1.016 bis 1.266kg	16,0	16,2	12,0
1.266 bis 1.516kg	13,0	13,2	9,8
1.516 bis 1.766kg	10,5	11,9	7,9
1.766 bis 2.016kg	8,9	10,8	6,7
2.016 bis 2.266kg	7,8	9,8	5,9
>2.266kg	6,4	8,7	4,8

*Fahrzeuggewicht ist geringer als 1016 kg pro Kategorie

In diesem Zusammenhang prüft die Regierung Ansätze, nach denen künftig Minderungsziele bestimmt werden sollen. Zur Diskussion stehen hierbei zum einen CAFE-Standards nach kalifornischem Vorbild oder zum anderen der oben genannte Top-Runner-Ansatz nach Gewichtsklassen und mit Gutschriften sowie alternative Fahrzyklen (CD34-Mode) und modifizierte Gewichtsklassen. Neben der Förderung von alternativen Fahrzeugen wie Elektro-, Hybrid-, Brennstoffzellen-, Erdgas-, Methanol und Autogasfahrzeugen (CO₂-Minderung von 2,2 Millionen Tonnen) [VTT MTN 2003c], untersuchen MOE und METI zudem die Verbreitung von sparsamen Dieselfahrzeugen. Voraussetzung für diese Politik ist jedoch, daß Dieselmotoren die Abgaswerte von Benzinfahrzeugen erreichen. Zum einen haben Selbstzünder in Japan ein schlechtes Image, zum anderen ist die durchschnittliche jährliche Fahrleistung in Japan (<10.000km) geringer als in Europa (12.000 bis 15.000km), sodaß der Kunde den Preisaufschlag bei Dieselfahrzeugen von ungefähr 150.000 bis 200.000 Yen im Vergleich zu Benzinfahrzeugen kaum wieder amortisieren kann. Zudem haben Dieselfahrzeuge Nachteile bei häufigem Anfahren und Halten im japanischen Stadtverkehr [WBCSD 2005, METI 2005; ACEA 2005b; ACEA 2004a]. Schließlich hat der Kraftstoff in Japan noch einen zu hohen Schwefelanteil. Ziel des METI ist die Einführung von Biokraftstoffen und die Etablierung von Kooperationen zwischen ölverarbeitender Industrie und den Automobilherstellern zur Verbesserung der Kraftstoffqualität (<10ppm) [Wada 2004; VTT 2001c; IFQC 2002, S. 2,].

Nach Vorbild der Elektro(nik)geräte ist mit dem Energy Saving Law seit April 2004 ein System zur Kennzeichnung verbrauchsgünstiger Fahrzeuge installiert [METI 2004; JAIA 2004; ACEA 2005a]. Bereits seit 2001 fördert die japanische Regierung mit entsprechenden Plaket-

⁷¹ Im Jahr 2005 erreichen die fünf großen Hersteller Honda, Toyota, Nissan, Mitsubishi und Mazda den Zielwert 2010, spätestens 2007 werden alle in Japan produzierten Fahrzeuge die Zielvorgaben erfüllen.

ten die Verbreitung und Entwicklung von schadstoffarmen und verbrauchsgünstigen Fahrzeugen (Low Emission Vehicles). Die mit den Kennzeichnungen verbundenen Steuererminderungen hängen dabei nicht von der Antriebstechnologie ab. Vielmehr richtet sich die Unterstützung nach den einzuhaltenden Kraftstoffzielvorgaben von 2010 und Abgasgrenzwerten von 2000 (siehe Abschnitt 3.3.4.4 und Tabelle 2-7) [JAMA 2005a, S. 51]. Händler sind in die Informationsverpflichtungen zu Schadstoffemissionen, Kraftstoffverbrauch und Kraftstofftyp eingebunden [Tokyo Metropolitan Government 2002b, S. 12].

2.4.6 Zusammenfassung

Der Gesetzgeber unterwirft Abgasemissionen und Verbrauch weltweit immer strengeren Bestimmungen, erhöht damit die Fertigungskosten und entscheidet (indirekt) bei der PKW-Auswahl mit. Umgekehrt muß die Politik die Verbreitung alternativer Techniken in einer gesellschaftlich verträglichen Art und Weise sicherstellen; in Japan sind etwa 10 Prozent der 65 Millionen Erwerbstätigen in der Automobilindustrie und deren Zulieferern tätig, der Automobilsektor in Deutschland sichert ungefähr 5 Millionen Arbeitsplätze, macht 15 Prozent des Sozialproduktes aus und trägt 20 Prozent zum Export bei [Junkernheinrich 1998, S. 211].⁷²

In diesem Konflikt aus unterschiedlichen politischen Zielen kanalisieren Nichtregierungsorganisationen (Non-Governmental-Organizations, NGO) die öffentliche Meinung, plazieren Umweltthemen mit breitangelegten Kampagnen in den Medien und üben auf diese Weise massiven Druck auf Politik und Unternehmen aus. Der folgende Abschnitt arbeitet gesellschaftliche Interessengruppen heraus und setzt sich mit der schrittweise Entwicklung eines Umweltthemas auseinander.

2.5 Gesellschaftliche Rahmenbedingungen

Mit der schrittweisen Zunahme des Umweltbewußtseins führt die breite Öffentlichkeit Veränderungen medienwirksam über Kampagnen von Nichtregierungsorganisationen herbei. Interessengruppen setzen Hersteller dabei unter öffentlichen und politischen Druck, initiieren Boykottaufrufe von Konsumenten und treten in direkte Verhandlungen mit den Unternehmen [Dyllick 1989]. Die Ziele der Interessengruppen sind vielfach national und international vergleichbar⁷³ und können Automobilunternehmen bei Nichtbeachtung in schwere Legitimitätskrisen führen. Zeitlich begrenzte Aktionen in Bezug auf Umweltschäden greifen über die Ordnungspolitik damit auch in das Produktportfolio von Automobilherstellern ein.

⁷² Die Initiative ‚CARS 21‘ (Competitive Automotive Regulatory for the 21st Century – Wettbewerbsfähiges Kraftfahrzeug-Regelungssystem für das 21. Jahrhundert) von EU-Kommission und Europäischem Automobilverband (ACEA) setzt sich für ein Gleichgewicht aus Wettbewerbsfähigkeit, Umweltschutz, Fahrzeugsicherheit und Kundenbedürfnissen ein [Wells 2005b].

⁷³ Siehe auch [Ducke 2005, S. 210; Takeuchi 2004].

Kapitel 2.5.1 identifiziert wichtige gesellschaftliche Interessengruppen. Kapitel 2.5.2 beschreibt am Beispiel eines Lebenszyklusmodells gesellschaftlicher Forderungen, wie sich Schwerpunkte bei Umweltthemen verschieben und wie sich aus den Themen eine kampagnenfähige Umweltbewegung entwickelt.

2.5.1 Identifikation gesellschaftlicher Akteure

Die Bedeutung nichtstaatlicher Interessengruppen als Impulsgeber für die Entwicklung eines Politikfeldes nimmt stetig zu. Durch die Identifikation gesellschaftlicher Akteure sind Unternehmen in der Lage, schwache Signale in sensiblen Umweltthemen gedanklich vorwegzunehmen. Häufig werden Immissionen anfangs überhaupt nicht wahrgenommen. Sobald jedoch ein Schwellenwert erreicht wird, der bei Dritten eine Minderung des Nutzens verursacht, werden gegenüber Unternehmen Interessen ausgesprochen [Jänicke 1995, S. 11]. Informationsquellen zur Erfassung von marktbezogenen, unternehmensbezogenen und gesellschaftsbezogenen Interessengruppen sind in Tabelle 2-8 aufgeführt.

Tabelle 2-8: Informationsgrundlagen zur Erfassung von Interessengruppen [Meffert und Kirchgeorg 1998, S. 96]

		Informationsgrundlagen für gesellschaftliche Interessengruppen		
		marktbezogen	unternehmensbezogen	gesellschaftsbezogen
Interessengruppen		Lieferanten, Kunden, Verbraucherorganisationen, Industrieverbände, Gewerkschaften etc.	Management, Angestellte, Arbeiter, Betriebsräte etc.	Exekutive, Judikative, Parteien, Umweltschutzinitiativen, Medien etc.
Informations-Quellen	speziell	Veröffentlichte Leitlinien zum Umweltschutz, freiwillige Umweltschutzmaßnahmen, Produkttests, repräsentative Markttests, Verkaufsmessen, Forschung und Entwicklung etc.	Unternehmensleitbild, Umweltschutzbeauftragte, Betriebsvereinbarungen, Gesetze, Verordnungen, etc.	Beschwerden von Anliegern, Standort-/ Regionalplanungen Verordnungen, Durchführungsvorschriften, Gesetze, Gesetzesinitiativen, Enquete-kommissionen, Parteiprogramme, Emissionskataster etc.
	allgemein	Analysen zum Wertewandel der Rechtsprechung, wissenschaftliche Entwicklungen, Ergebnisse aus Technologiefolgenabschätzungen und Umweltverträglichkeitsprüfungen, ökologische Kataster, Veröffentlichungen etc.		

In Deutschland nehmen Interessengruppen im Automobilbereich eine wichtige Rolle bei der Entwicklung umweltorientierter Verbesserungsmaßnahmen ein. Umweltbundesamt (UBA), Deutsche Umwelthilfe (DUH), Greenpeace und andere Organisationen empfehlen dem Bundesministerium für Umwelt (BMU) die flächendeckende Einführung von Rußpartikelfiltern, rufen im November 2002 öffentlichkeitswirksam die Initiative "Kein Diesel ohne Filter" ins Leben und fordern verbindliche Kraftstoffverbrauchsgrenzwerte ab 2008 für alle Neuwagen [ACEA 2002a. DUH 2005a]. Der Bundesverband der Verbraucherzentralen klagt auf Unterlassung der EU-3-Werbung für den Volkswagen Touareg. DUH und UBA treten gemeinsam in den USA auf und greifen spezielle Modelle und Hersteller an.

Anders als in Deutschland hat der Umweltschutz in Japan eine stark zivilrechtliche Komponente. Da die in den 60er Jahren erlassenen Sondergesetze zur Umweltverschmutzung nur unzureichende Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vorsehen, beginnen Bürgerbewegungen zivilrechtliche Prozesse wegen unerlaubter Handlung zu führen [Marutschke 1999, S. 196]. So verurteilt das Tokyo District Court⁷⁴, vergleichbar dem Landgericht, im Oktober 2002 die Zentralregierung, die Tokioter Stadtregierung und die Stadtautobahnbetreiber zu Schadensersatzzahlungen in Höhe von 80 Millionen Yen (ca. 640.000 EUR) an 7 Asthmatiker wegen mangelnder Überwachung der selbst gesetzten Emissionsstandards und verurteilen damit gleichzeitig die japanische Automobilindustrie [ACEA 2002a; JT 2002].

In den USA setzen insbesondere grüne Umweltgruppen aus Kalifornien und den nordöstlichen Bundesstaaten die Politik und damit letztlich die Hersteller unter Druck (siehe 2.3). Dabei verfehlt insbesondere die Verzahnung von Religion, Umweltschutz und Moral ihre Wirkung bei gläubigen Amerikanern nicht [N.N. 2002; ACEA 2002a]. Tabelle 2-9 zeigt die treibenden Faktoren für alternative Fahrzeuge in den USA, in der EU und in Japan auf.

Tabelle 2-9: Treibende Faktoren für alternative Fahrzeuge [E4Tech]

Treibende Faktoren	USA	EU	Japan	Bemerkungen
Verbesserung der Luftqualität	+++	O	+++	- Primär allgemein gesellschaftlicher Vorteil - Wichtiger Faktor auch in anderen Regionen, z.B. China - Sehr wichtiger Faktor für Busse im ÖPNV, insbesondere wegen Partikel-Emissionen
CO ₂ -Reduzierung	O	+++	++	- Primär allgemein gesellschaftlicher Vorteil
Sicherheit der Energieversorgung	+++	+	+++	- Primär allgemein gesellschaftlicher Vorteil - Abhängig von nationalen Energieressourcen
Langfristige Wettbewerbsfähigkeit der Automobilindustrie	+++	+++	+++	- Herstellerseitig getrieben vom Markenimage zur Reduzierung bzw. Beseitigung von Umweltkritik - Wichtig auch für Süd-Korea
Treibende Faktoren für alternative Fahrzeuge sind ausgerichtet auf allgemeine gesellschaftliche Vorteile, aber sie werden in den Märkten unterschiedlich bewertet.				
Bewertung (nur horizontaler Vergleich) O Klein + Mittel ++ Groß +++ Sehr groß				

2.5.2 Lebenszyklusmodell gesellschaftlicher Forderungen

In Anlehnung an den Grundgedanken des Produktlebenszyklus knüpfen Lebenszyklusmodelle gesellschaftlicher Anliegen an öffentlich diskutierte Umweltthemen an. Aus gesellschaftspolitischer Perspektive haben Luhmann und Downs mit Phasenmodellen ein Lebenszykluskonzept öffentlicher Anliegen diskutiert [Luhmann 1979; Downs 1972]. Dyllick überträgt die Phasenmodelle auf unternehmensstrategische Fragen und unterscheidet dabei fünf Entwick-

⁷⁴ Anm.: Vergleichbar mit dem ‚Landgericht‘ [Schmidt 2003]

lungsphasen des Lebenszyklus öffentlicher Forderungen [Dyllick 1989, S. 241ff.; Ries und Wiedemann 2003, S: 23].

- Latenzphase
- Emergenzphase
- Aufschwungphase
- Reifephase
- Abschwungphase

Zunächst kündigt sich mit schwachen Signalen ein Thema an. Mit zunehmender Problemkonkretisierung nimmt der Verhandlungsspielraum von Unternehmen ab, so daß es für die Ableitung von Reaktionsstrategien wichtig ist, die jeweilige Phase der gesellschaftlichen Forderungen zu bestimmen. In der Latenzphase identifizieren Sachverständige Umweltprobleme. Die breite Öffentlichkeit tabuisiert das Thema noch (Problemerkennung). In der Emergenzphase vertieft sich die wissenschaftliche Auseinandersetzung. Gruppen zeigen zunehmend Interesse, während Bevölkerungsteile die Beschäftigung mit dem Thema verweigern (Problemdefinition). In der Aufschwungphase überführen Massenmedien das Thema zunehmend von einer wissenschaftlichen in eine breite öffentliche Diskussion und tragen zu einer Politisierung des Problems mit zunehmenden Umweltschutzansprüchen, Imagebeeinträchtigungen und Boykottaufrufen bei (Zielbestimmung) [Dyllick 1989, S. 76ff.; Simonis 1985, S. 218; Ries und Weidemann 2003, S: 24ff.]. In der Reifephase sind politische Fraktionen gezwungen, sich mit dem öffentlichen Anliegen auseinanderzusetzen und politisch-administrative Regelungen zur Problemlösung voranzutreiben. (Phase der Problemlösung). Der Lebenszyklus öffentlicher Forderungen tritt mit der Durchsetzung der Regelungen in eine Abschwungphase (Phase des Vollzug) [Meffert und Kirchgeorg 1998, S. 97ff.].

Tabelle 2-10 zeigt eine Übersicht der in den deutschen Medien behandelten umwelt- und verkehrsbezogenen Themen. Das Thema ‚Klima‘ mit Beiträgen zum Emissionshandel bewegt die breite Öffentlichkeit am meisten. Zudem ist das Thema ‚Straßenbenutzungsgebühren‘ mit der Kündigung und dem abschließenden Neuabschluß des Mautvertrages sehr wichtig. Hinter dem Thema ‚Diesel‘ verbirgt sich die Diskussion um eine Förderung von Rußpartikelfiltern und die Einhaltung der EU-Luftqualitätsrichtlinie von Kommunen. Das Thema Luftbelastung durch Feinstaub verliert dabei mit der Entwicklung von Filtertechniken an Bedeutung und wird (mittelfristig) durch das Thema Stickoxide abgelöst, da eine leistungsfähige und vor allem kostengünstige DeNO_x-Abgasreinigung für PKW noch nicht verfügbar ist. Viele der beobachteten Themen lassen sich zum besseren Vergleich in kleinere Untergruppen einteilen. So bestimmt das Thema ‚Hybrid‘ die Untergruppe Antriebskonzepte und ‚Kfz-Steuer‘ beherrscht das Feld der umweltpolitischen Instrumente [imug 2005; BMU 2004; Kalt 2003, S.99ff.].

Tabelle 2-10: Diskussionen und Ereignisse von 2000 bis 2004 im Themenfeld Umwelt und Verkehr 2004 in Deutschland [imug 2005, BMU 2004]

Rang	2000	2001	2002	2003	2004
1	Klima allgemein	Klima allgemein	Klima allgemein	Straßenbenutzungsgebühren	Klima allgemein
2	Ökologische Steuerreform	CO ₂ -Emissionen	„Sustainable Development“	Klima allgemein	Straßenbenutzungsgebühren
3	Güterverkehr	Ökologische Steuerreform	Straßenbenutzungsgebühren	Diesel	Diesel
4	Mineralölsteuer	Straßenbenutzungsgebühren	CO ₂ -Emissionen	Transrapid	Verkehrssicherheit
5	Verkehrssicherheit	Verkehrssicherheit	Transrapid	Telematik	Güterverkehr
6	Transrapid	Kraftstoffe	Infrastruktur	Güterverkehr	Telematik
7	Straßenbenutzungsgebühren	Güterverkehr	Öffentlicher Personennahverkehr	Infrastruktur	Luftverkehr
8	Entfernungspauschale	Öffentlicher Personennahverkehr	Ökologische Steuerreform	Verkehrssicherheit	Kosten, Autohaltung
9	Öffentlicher Personennahverkehr	Brennstoffzelle	Verkehrssicherheit	CO ₂ -Emissionen	Kfz-Steuer
10	CO ₂ -Emissionen	Naturschutz	Güterverkehr	Öffentlicher Personennahverkehr	Infrastruktur

Befragungen von 703 Herstellern verschiedener Wirtschaftszweige in Japan zur Entwicklung umweltpolitischer Themen ergeben das Bild in Tabelle 2-11.

Tabelle 2-11: Befragung von Führungskräften nach aktuellen umweltpolitischen Themen [VTT 2003b]

Year	Major contents of the survey	Trend of environment issues
1997	<ul style="list-style-type: none"> Industrial waste, global warming measure Environmental reports, ISO 	<ul style="list-style-type: none"> Industrial Waste Disposal Law revised Kyoto Protocol concluded
1998	<ul style="list-style-type: none"> Environmental accounting Chemical substance control 	<ul style="list-style-type: none"> The outline of Global Warming Measure Promotion
1999	<ul style="list-style-type: none"> Non-manufacturer survey conducted Zero-emissions Life Cycle Assessment Green procurement 	<ul style="list-style-type: none"> Revised Energy Conservation Law (top runner system) Dioxin pollution became a social problem Eco-Fund sold first in Japan
2000	<ul style="list-style-type: none"> Environment risk control Quantitative questions 	<ul style="list-style-type: none"> Receptacle Packing Recycling Law Special Dioxin Measure Law
2001	<ul style="list-style-type: none"> Overseas operations measure 	<ul style="list-style-type: none"> Circulation-type Society Promotion Law Home Electronics Recycling Law Green Purchasing Law Pollutant Release and Transfer Register to strengthen control of chemical substances
2002	<ul style="list-style-type: none"> Soil pollution measure Overseas operations measure 	<ul style="list-style-type: none"> Johannesburg Environment & Development Summit Kyoto Protocol ratified by Japanese Government Construction Recycling Law
2003		<ul style="list-style-type: none"> Soil Pollution Measure Law Vehicle Recycling Law Kyoto protocol effective (planned)

Der Lebenszyklus gesellschaftlicher Anliegen zeigt sich auch in der Entwicklung des Umweltschutzes in Deutschland und Japan. In den 50er Jahren gibt es insbesondere in den deutschen Ballungszentren akute Umweltprobleme. Gleichwohl nimmt die breite Bevölkerung diese als Begleiterscheinung der Wohlstandssteigerung hin. In den 60er Jahren führt die Politik erste Emissionsschutzgesetze nach Stand der Technik ein. In der Phase der sozialliberalen Koalition setzen Umweltgruppen die Politik zunehmend unter Druck. Aus den Bürgerinitiativen entwickelt sich zu Beginn der 80er Jahre eine grüne Partei [Tischler 1994, S. 93ff.; Müller 1986, S. 45ff.].

In der sich explosionsartig entwickelnden Industrie Japans findet vergleichsweise frühzeitig eine breite gesellschaftliche Diskussion statt, durch die das Thema Umweltschutz (*kōgai*) zu einem politischen Thema wird und auf das die in einer Legitimitätskrise stehende Politik gezwungen ist, mit Maßnahmen zu reagieren. Bereits in den fünfziger Jahren kommt es durch industrielle Umweltbelastungen zu vielen Krankheiten und Todesfällen.⁷⁵ Seit Mitte der siebziger Jahre setzt die japanische Politik effektive umweltpolitische Maßnahmen durch, die zu spürbaren Umweltentlastungen führen. In der Folge nehmen die umweltpolitischen Konflikte

⁷⁵ Neben Kraftwerks-, Industrie- und Kraftfahrzeugabgasen und der Häufung von Atemwegserkrankungen erregen die Minamata- und die Itai-Itai-Krankheit internationales Aufsehen, beide verursacht durch Schwermetalleinleitungen von Industriebetrieben in Gewässer [Tsuru 1999, S. 92ff.; Weidner 1996a, S. 24ff.]

ab [Tsuru 1999, S. 92ff.; Weidner 1996b, S. 125; Miyazaki 1996, S. 135ff.].⁷⁶ Gleichwohl sehen die in den 60er Jahren erlassenen Umweltschutzgesetze noch unzureichende Maßnahmen vor, so daß Bürgerbewegungen frühzeitig zivilrechtliche Prozesse wegen unerlaubter Handlung anstrengen. Öffentliche Gerichtsverfahren spielen trotz Konsensprinzip⁷⁷ bis heute in Japan eine wichtige Rolle zur Durchsetzung der fragmentiert organisierten Umweltinteressen (siehe 3-3-2 Umwelthaftungsrecht) [Marutschke 1999; Fojanty-Jost 1996, S. 11; Dücke 2005, S. 210].⁷⁸ Als Folge üben insbesondere Politiker der stark belasteten Großstädte durch Kampagnen Druck auf die Zentralregierung aus. Diese Triebkraft mündet in den Erlass des Umweltrahmengesetzes im Jahr 1992, das die grundlegenden Prinzipien und Ziele der japanischen Umweltpolitik regelt [Miyazaki 1996, S. 144f.]. In Deutschland und in Japan wird als Reaktion auf Umweltbelastungen und steigendes Umweltbewußtsein in der Bevölkerung ein ausdifferenziertes rechtliches Instrumentarium geschaffen [Fojanty-Jost 1996, S. 9].⁷⁹

2.6 Zusammenfassung

Neue Antriebstechniken und Kraftstoffe haben in der Vergangenheit wesentlich zur Emissionsminderung beigetragen. Hierbei hat der Gesetzgeber durch politische Inzentivierungen die Verbreitung von umweltfreundlichen Techniken gefördert. Trotzdem bleibt der Individualverkehr eine wesentliche Ursache für die (direkten) lokalen Belastungen des Menschen durch teilverbrannte Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid, Stickoxide und Feinstaubemissionen sowie die klimaschädlichen, überregional wirksamen Kohlendioxidemissionen. Die bestimmenden Größen sind die Entwicklung der Fahrleistungen sowie die spezifischen Emissionen und hierbei insbesondere die Zusammensetzung des Fahrzeugbestands. Bei der sich hieran anschließenden Diskussion um den Einsatz umweltpolitischer Instrumente im Verkehrsbereich ist dieser Interessenkonflikt – einerseits Zunahmen der Fahrleistungen, andererseits Umweltentlastung aufgrund verbesserter Technik – zu beachten.

Es ist unbestritten, daß die Fahrleistungen der Bürger einen nicht unerheblichen Einfluß auf die Umweltbelastung haben. Soweit sich also infolge steigender Energieeffizienz die spezifischen Emissionen vermindern, haben die Fahrzeugnutzer bei konstantem Kraftstoffpreis und

⁷⁶ Die japanische Umweltpolitik der Nachkriegszeit läßt sich in fünf Phasen gliedern: die ökologische Ignoranz in den fünfziger und sechziger Jahren, die symbolische Umweltpolitik bis Anfang der siebziger Jahre, die Phase aktiver technokratischer Umweltpolitik, die in die Phase der umweltpolitischen Stagnation mündet und die fünfte Phase der Redynamisierung und Internationalisierung der Umweltpolitik. Die letzte Phase hat mit dem Ziel einer „dauerhaft tragfähigen Entwicklung“ und der damit verbundenen Gesetze und Maßnahmenbündel gegenwärtig einen Höhepunkt erreicht [Miyazaki 1996, S. 135ff.; Broadbent 1998; Weidner 1996a, S. 157].

⁷⁷ Zur Bedeutung des ‘Konsensprinzips’ zwischen Behörden und Wirtschaft in Japan siehe [Odrich 1986].

⁷⁸ OG Osaka, Urteil vom 27.11.1975, Hanji 797, 36.

DG Nagoya, Urteil vom 11.09.1980, Hanji 976, 40; OG Nagoya, Urteil vom 12.04.1985, Hanji 1150, 30.

⁷⁹ Da die Märkte Deutschlands und Japans im Mittelpunkt der folgenden Betrachtung stehen, entfällt an dieser Stelle eine explizite Untersuchung der Umweltschutzentwicklung in den USA.

demzufolge sinkendem Kraftstoffpreis pro Kilometer einen Anreiz, die Fahrleistungen auszuweiten. Um diesen sogenannten „Rebound“-Effekt zu vermeiden, müßten – theoretisch – die Kraftstoffpreise im gleichen Ausmaß wie die Umweltentlastung durch sich weiterentwickelnde (Automobil-)technik zunehmen.

Der politische Entscheidungsträger wird das Anwachsen der Fahrleistungen durch gesetzgeberische Maßnahmen indes nicht beeinflussen und letztlich einschränken wollen, weil die zunehmende Mobilität ein Teil des Wirtschaftswachstums ist. Da auch die betrieblichen Entscheidungsträger im Rahmen der Produktstrategie auf die Fahrleistung selbst keinen Einfluß haben, stehen demzufolge ausschließlich die Anreize zur Entwicklung neuer Technologien im Mittelpunkt der folgenden Betrachtung.

Zur Durchführung dieser Maßnahmen steht der Politik eine Palette an umweltpolitischen Anreizinstrumenten zur Verfügung. Das folgende Kapitel erläutert die Instrumente in ihrer Wirkung und wählt schließlich geeignete Werkzeuge zur Minderung von Umweltbelastungen aus.

3 Politische Instrumente im Verkehr

Die in Kapitel 2 aufgezeigten negativen Auswirkungen des Individualverkehrs zwingen den Gesetzgeber zur umweltpolitischen Ausformung einer dauerhaft tragfähigen Mobilität. Gleichzeitig müssen Unternehmen die Folgen von Regulierungen abschätzen und in ihren strategischen Planungen berücksichtigen. Ziel der Umweltpolitik ist es, die Automobilindustrie zur Herstellung umweltschonender Technik und die Verkehrsteilnehmer zur Minderung der Fahrleistung und zum Kauf eines umweltfreundlichen Fahrzeugs zu bewegen. Da sowohl politische als auch betriebliche Entscheidungsträger nur eingeschränkte Möglichkeiten haben, auf die Fahrleistungen der Konsumenten einzuwirken und dies aus wirtschaftlichen Gründen auch nicht wollen, stehen Maßnahmen zur Förderung neuer Techniken im Mittelpunkt.

Abschnitt 3.1 setzt sich mit den Zielen umweltpolitischer Eingriffe auseinander. Davon ausgehend untersucht Abschnitt 3.2, wie die für Umweltbelastungen maßgeblichen Wirkzusammenhänge gelenkt werden können. Abschnitt 3.3 arbeitet heraus, mit welchen politischen Instrumenten der Staat auf negative Umweltfolgen reagieren kann und bewertet diese zusammenfassend anhand makroökonomischer Kriterien. Abschnitt 3.4 zeigt die Notwendigkeit zur Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungswerkzeugs auf.

3.1 Grundprinzipien umweltpolitischer Eingriffe

Zur Herausarbeitung konkreter Instrumente müssen zunächst die *Grundprinzipien der Umweltpolitik* erläutert werden. Die Grundprinzipien umweltpolitischer Eingriffe beruhen auf

- dem Vorsorgeprinzip, nach dem Umweltgefahren bzw. -belastungen bereits im Vorfeld ihrer Entstehung zu vermeiden sind,
- dem Verursacherprinzip, nach dem jeder, der die Umwelt schädigt, für die Kosten dieser Belastung oder Schädigung aufkommen soll, sowie
- dem Kooperationsprinzip, wonach sich alle gesellschaftlichen Kräfte einer gesunden Umwelt verpflichtet fühlen und durch freiwillig erbrachte Leistungen gemeinsam Schaden abgewendet werden soll [Bundesregierung 1972].

Aus den Grundprinzipien leiten sich *übergeordnete Umweltziele* ab. Diese liegen im Schutz und der Erhaltung

- von Leben und Gesundheit des Menschen, von Tieren und Pflanzen – auch für spätere Generationen,
- von Ökosystemen als natürlicher Existenzgrundlage des Menschen,
- der natürlichen Ressourcen Boden, Wasser und Luft für vielfältige Nutzungsansprüche des Menschen und
- von Sachgütern als kulturelle und wirtschaftliche Werte des Einzelnen und der Gemeinschaft.

Spezielle Umweltziele sind hierbei die Verminderung der – durch den Menschen verursachten – Treibhausgasemissionen im Rahmen der natürlichen Klimaschwankungen, der Schutz des Menschen vor Luftverunreinigungen und die Schonung natürlicher Ressourcen. Die Luftreinhaltepolitik der USA von 1970, der sogenannte ‚Clean Air Act‘ ist ein Beispiel für ein Umweltqualitätsziel für Schadstoffe. Mit den Kyoto-Vereinbarungen von 1997 haben sich viele Industrieländer zu einer mengenmäßigen Begrenzung von Treibhausgasen verpflichtet [Kösters 1997, S. 189f.; Bringezu 1997, S. 2].⁹⁰

Der politische Entscheidungsträger kann die Umweltbelastungen nur dann den Verursachern anlasten, wenn die jeweiligen Schäden, die sogenannten „externen Kosten“, genau erfaßt und monetär bewertet werden können und wenn es möglich ist, Verursacher eindeutig zu identifizieren. Diese Bedingungen sind selten gegeben. Anforderung an die Politik ist es, die umweltpolitischen Ziele in operationaler Form zu formulieren und diese dann in einem weiteren Schritt in geeignete Lenkungsmaßnahmen umzusetzen. Der Ansatz, bestimmte Emissionsniveaus anhand umweltpolitischer Qualitätsziele, technischer Vermeidungspotentiale und ökonomischer Zumutbarkeit zu definieren, ist dabei weitgehend unumstritten [Endres und Holm-Müller 1998, S. 1ff.; Münch 1995, S. 220].

3.2 Internalisierung negativer externer Effekte

3.2.1 *Umweltnutzung als Problem ökonomischer Knappheit*

Die Umweltökonomie unterscheidet private und öffentliche Güter. Bei privaten Gütern äußert das Wirtschaftssubjekt seine Präferenz für ein Gut zumeist über den Preis. Aufgrund von Budgetbeschränkungen erwerben die Wirtschaftseinheiten nur soviel von dem Gut, wie diese es sich entsprechend ihrer Präferenzen für andere Güter leisten wollen. Damit stellt sich bei rationalem Verhalten aller Wirtschaftssubjekte eine optimale Allokation ein. Zur Erreichung einer optimalen, insbesondere wertadäquaten, Allokation müssen für ‚Umweltgüter‘ Märkte mit Knappheitspreisen geschaffen werden, das heißt, daß das Gut ‚Umwelt‘ nicht mehr als frei nutzbares öffentliches Gut behandelt wird, sondern dessen Wert dem Nutzer über den Nutzungspreis verdeutlicht wird. Dazu ist eine Internalisierung negativer externer Effekte notwendig [Kemfert 1998, S. 26f.; Altmann 1997, S. 75ff.; Troja 1998, S. 28ff.].

Öffentliche Güter können alle Wirtschaftssubjekte gleichermaßen verwenden, ohne daß diese in relevantem Ausmaß abnehmen und die Wirtschaftseinheiten hierfür einen Preis entrichten müssen [Schumann 1987, S. 411f.]. Unter diesem Blickwinkel gelten viele Umweltgüter (z.B. „saubere“ Luft und Frischwasser) bisher als öffentliche Güter. Aufgrund der zunehmenden Umweltverschmutzung werden diese frei verfügbaren Güter jedoch immer weiter abgebaut,

⁹⁰ Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) §1 Abs. 1, Grundgesetz (GG) Artikel 20a

so daß diese nicht mehr unerschöpflich sind. Hierbei zeigt sich eine Nutzungskonkurrenz zwischen der Umwelt in ihrer Funktion als Schadstoffempfänger einerseits und als Lieferant öffentlicher Umweltgüter andererseits. Die nicht durch natürliche Regenerationsprozesse neutralisierten Emissionen lagern sich in den Umweltmedien ab und akkumulieren sich im Zeitverlauf zu entsprechenden Schadstoffbeständen (Immissionen), die letztlich bei Überschreitung spezifischer Grenzwerte die Umweltqualität beeinträchtigen [Michaelis 1996, S. 5f.].⁹¹

Bei weiterer kostenloser Bereitstellung dieser knappen Güter sind die (externen) Kosten für die Bereitstellung von der Allgemeinheit zu tragen (z.B. Frischwasseraufbereitung). Monetär zu bewertende Umweltkosten ergeben sich aus einem schlechteren Umweltzustand (z.B. Gesundheitsschäden durch Luftverschmutzung) und aus der Verschlechterung von (zukünftigen) Produktionsmöglichkeiten (z.B. Ressourcenabschöpfung), wobei diese um so höher sind, je größer das Ausmaß der Schädigung ist. Der zunächst positive externe Effekt kostenloser Umweltnutzung schlägt durch die Übernutzung der kostenlosen Ressource Umwelt in einen negativen externen Effekt um. Eine Fehlallokation knapper Umweltgüter tritt ein. Die physischen Umweltschäden sind durch Investitionen in umweltfreundlichere Technologien zu verringern und verursachen Vermeidungskosten, die um so höher ausfallen, je kleiner das verbleibende Ausmaß der Schädigung ist [Bogaschewsky 1995, S. 41f.; Fritsch et al. 1996, S. 76ff.].

Im Individualverkehr werden die Kosten von Luftverunreinigungen und Zunahme klimarelevanter Gase bislang nur ansatzweise im Nutzungspreis von Personenkraftwagen und Kraftstoffen berücksichtigt. Es muß also eine Institution, den Staat, geben, der die Umweltverträglichkeit einzelwirtschaftlicher Produktion und privaten Konsums sichert, indem er die Rechte für den Gebrauch von Ressourcen zuteilt [Roloff 1995, S. 230]. Die Umweltpolitik ergreift daher zunehmend Maßnahmen, um negative externe Effekte im Individualverkehr zu internalisieren.

3.2.2 Pareto-Optimum als umweltpolitisches Leitbild

Ökonomische Aktivitäten haben direkt oder indirekt Umweltbelastungen zur Folge, so daß ein vollkommener Verzicht auf Umweltverschmutzung nicht möglich oder mit hohen (Opportunitäts-)kosten verbunden ist.⁹² Es stellt sich daher die Frage, welches Schadensniveau die Gesellschaft anstreben soll oder was der Grad ‚optimaler‘ Verschmutzung ist. Für die auf der Theorie des Marktversagens beruhende traditionelle neoklassische Umweltökonomie hat die

⁹¹ Dabei ist zu beachten, daß sich die Akkumulation von Schadstoffbeständen auch nachteilig auf die Regenerationskapazität der Umweltmedien selbst auswirkt, sodaß ab einem bestimmten Emissionswert ein sich selbst verstärkender Rückkopplungseffekt einsetzt [Michaelis 1996, S. 6].

⁹² Je weniger die Umweltmedien Wasser, Luft und Boden als Schadstoffempfänger genutzt werden dürfen um so mehr knappe Produktionsfaktoren sind aus der eigentlichen Güterproduktion abzuziehen und für umweltentlastende Maßnahmen (z.B. Filteranlagen) einzusetzen [Michaelis 1996, S. 7f.; Cansier 1995].

Effizienz des umweltpolitischen Instrumentariums eine wesentliche Bedeutung. Ziel ist es, die Gesamtkosten aus Schadens- und Vermeidungskosten ($S(E)$ und $K(E)$) zu minimieren (siehe Abbildung 3-1). Dabei bezeichnet E die Höhe der betrachteten Schadstoffemissionen, die Variable S den Verlust an Umweltqualität und K die mit der Emissionsvermeidung zusammenhängenden (Opportunitäts-)kosten. Das (pareto-)optimale Schadensniveau bestimmt sich aus der Bedingung, daß die Grenzkosten der Schäden gleich den Grenzkosten der Schadensvermeidung sein müssen (E^*). Die Grenzscha­den $S'(E)$ geben an, welcher ‚zusätzliche‘ monetär bewertete Verlust an Umweltqualität entsteht, wenn sich die Emissionen um eine Einheit erhöhen. Entsprechend geben die Grenzkosten $K'(E)$ an, welche zusätzlichen Vermeidungskosten entstehen, wenn die Emissionen um eine weitere Einheit vermindert werden [Michaelis 1996, S. 7ff.; Fritsch et al. 1996, S. 81ff.].⁹³

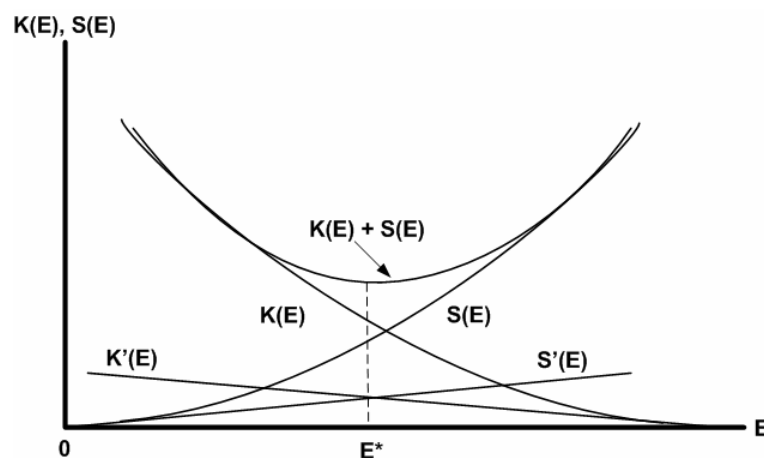


Abbildung 3-1: Bestimmung des gesellschaftlich ‚optimalen‘ Emissionsniveaus [Michaelis 1996, S. 10f.]

Das Pareto-Kriterium sagt noch nichts darüber aus, wie sich die im Optimum realisierten Opportunitätskosten auf die Mitglieder der Gesellschaft verteilen. Das Optimum besagt nur, daß die Gewinner einer umweltpolitischen Maßnahme – theoretisch – in der Lage sind, die Verlierer für Nutzeneinbußen zu kompensieren. Die Verteilungswirkung hängt nicht nur vom angestrebten Ziel, sondern auch von der instrumentellen Ausgestaltung ab. Darüber hinaus ist die Bestimmung einer gesellschaftlichen Vermeidungs- und Schadenskostenfunktion mit erheblichen Problemen verbunden. Die Festlegung eines optimalen Emissionsniveaus ist daher nur näherungsweise möglich – insbesondere, weil sich das Optimum durch viele technische, ökonomische und ökologische Größen determiniert und damit einem steten Wandel unterliegt [Michaelis 1996, S. 11f.].

Umweltprobleme sind aus ökonomischer Sicht Knappheitsprobleme. Zur Lösung der aus diesen Problemen resultierenden Konflikte sind verschiedene Allokationsmechanismen denkbar.

⁹³ Anm.: Hier stellt sich auch die Frage, inwieweit spätere Umweltschäden und Vermeidungskosten späterer Generationen zu berücksichtigen sind (Ökologische Ökonomie) [Hampicke 1992].

Die Internalisierung negativer externer Effekte ist sowohl über die von Pigou entwickelte Steuerlösung als auch über den von Coase entwickelten Ansatz einer Verhandlungslösung zwischen den Parteien zu verwirklichen.⁹⁴

Die Pigou-Lösung weist dem Staat die zentrale Rolle zu. Dieser hat die Aufgabe, die negativen externen Kosten der Umweltnutzung über eine Besteuerung von Emissionen, die sogenannte Pigou-Steuer, oder eine Subventionierung von Emissionsminderungen zu internalisieren. Umweltbelastungen werden vermieden, solange die Kosten zusätzlicher Vermeidung⁹⁵ geringer sind als der Steuersatz. Die Verhandlungslösung von Coase beschränkt die Rolle des Staates auf die Festlegung und Durchsetzung von Verfügungsrechten (engl. property rights) an dem Gut ‚Umwelt‘. Die Internalisierung erfolgt hier über freiwillige, dezentrale Verhandlungen zwischen Verursachern und Geschädigten, in denen die jeweiligen Nutzungsansprüche geklärt werden und somit der optimale Verschmutzungsgrad erreicht wird. Der Coase-Ansatz gründet sich darauf, daß sich sowohl Verursacher als auch Geschädigter durch eine gemeinsame Lösung besser stellen und Unterlassungs- bzw. Kompensationszahlungen vereinbaren [Hemmelskamp 1999, S. 25ff.; Kemfert 1998, S. 26f.].

Beide Ansätze lassen sich nicht vollständig umsetzen. Die Verhandlungslösung von Coase setzt vollständige Information der Beteiligten voraus. Da es sich bei dem Gut ‚Umwelt‘ zudem um ein öffentliches Gut handelt, werden bei Umweltproblemen mit vielen Verursachern pareto-optimale Verhandlungslösungen durch Trittbrettfahrer verhindert. Die Pigou-Lösung hat den Nachteil, daß wegen der Informationsdefizite die externen Kosten nicht eindeutig bewertet und damit der richtige Steuersatz nicht genau ermittelt werden können [Kemfert 1998, S. 26f.; Altmann 1997, S. 79f.; Gawel 1991].

Die Umweltpolitik strebt daher keine vollständige Internalisierung der negativen externen Effekte an, sondern legt in Anlehnung an den von W. E. Oates und W. J. Baumol entwickelten Standard-Preis-Ansatz ein bestimmtes Umweltschutzniveau fest. Die über die Zielgröße hinausgehende Verschmutzung soll beim in der Tradition der Pigou-Lösung stehenden Preis-Standard-Ansatz mit einem Steuersatz abgegolten werden, der sich an den Grenzvermeidungskosten orientiert. Zu diesem Zweck ist die Höhe des Steuersatzes – theoretisch – in einer sich wiederholenden „Trial and Error-Methode“ so lange zu variieren, bis das gewünschte Ergebnis erreicht ist [Baumol und Oates 1988; Kemfert 1998, S. 31f; Altmann 1997, S. 126ff., 144ff.].⁹⁶ Für die Umsetzung dieser Umweltschutzziele kann der politische Entscheidungsträger auf verschiedene Instrumente zurückgreifen, die in ordnungsrechtliche, ökonomische und informatorische bzw. freiwillige Instrumente unterschieden werden können [Kösters

⁹⁴ Zu den Strategien zur Internalisierung externer Effekt gehört auch das Haftungsrecht (siehe Kapitel 3.3.3).

⁹⁵ Grenzkosten der Schadensvermeidung

⁹⁶ Die „Trial-and-Error-Methode“ führt in der Praxis zu Glaubwürdigkeitsverlust der Politik und hohem Verwaltungsaufwand.

1997, S. 189f.; Hemmelskamp 1999, S. 26]. Mit Hilfe dieser Instrumente will die Politik zwei Effekte erreichen: Im Sinne der oben angegebenen Lenkungsfunktion sollen umweltpolitische Wirkungen erzielt werden, also eine Senkung des Verbrauchs umweltbelastender Ressourcen und eine Reduktion von Emissionen. Zweitens sollen die Instrumente zur Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit – theoretisch – keine fiskalische Funktion haben, also aufkommensneutral und nicht auf zusätzliche Steuereinnahmen ausgerichtet sein. Dabei sind nicht nur die unter Abschnitt 2-4 der politisch-rechtlichen Rahmenbedingungen erläuterten Umweltnormen und Umweltziele international sehr unterschiedlich. Vielmehr weichen auch die Maßnahmen und Instrumente weltweit voneinander ab [Altmann 1997, S. 128, 346].

3.3 Umwelt- und verkehrspolitische Anreizinstrumente

In diesem Abschnitt werden verschiedene Instrumente der Umweltpolitik für den Bereich des Individualverkehrs vorgestellt, mit denen eine Beeinflussung der Zusammensetzung des Fahrzeugbestandes mit dem Ziel der Emissionsminderung erzielt werden kann. Das klassische Instrumentarium besteht aus ordnungsrechtlichen, ökonomischen sowie informatorischen, organisatorischen und freiwilligen Instrumenten. Die Instrumente können zudem nach ihrer Eingriffsstelle im Wirtschaftsprozeß den Input und den Output von Produktionsprozessen regulieren [Hemmelskamp 1999, S. 26; Münch 1995, S. 221f.].

3.3.1 Überblick

Ansatzpunkte für umweltpolitische Instrumente im Individualverkehr sind die Fahrzeugtechnik und das Fahrverhalten. Die Technik bestimmt das Minderungspotential und die tatsächlichen Emissionen hängen zudem von der Fahrleistung ab. Folglich gibt es zwei Adressaten für umweltpolitische Maßnahmen: Fahrzeug- und Betriebsmittelhersteller (Mineralölindustrie) und den Fahrzeugnutzer [Hemmelskamp 1999, S. 26; Münch 1995, S. 221f.].

In Anbetracht der unterproportional auf Preise reagierenden Elastizitäten im Individualverkehr ist ein einzelnes umweltpolitisches Anreizinstrument nicht durchsetzungsfähig. Vielmehr ist aus Sicht der Umweltpolitik eine sinnvoll dosierte Kombination umweltpolitischer Instrumente erforderlich [Gawel 1991]. Tabelle 3-1 zeigt die zur Verfügung stehenden Instrumente im Überblick:

Tabelle 3-1: Umweltpolitische Instrumente [Hemmelskamp 1999, S. 27; Michaelis 1996, S. 26]

Ordnungsrechtliche Instrumente	Ökonomische Instrumente	Informatorische, organisatorische und freiwillige Instrumente
<ul style="list-style-type: none"> • Unterlassungsauflagen • Verwendungsauflagen <p><i>z.B. CO₂-Grenzwerte, Abgasgrenzwerte, Straßenbenutzungsggebühren, Geschwindigkeitsbeschränkungen, Fahrverbote, Innenstadtperrungen, Raumordnungspolitik, verkehrsflußverbessernde Maßnahmen.</i></p>	<p>Mit staatlichem Bewirtschaftungskonzept</p> <ul style="list-style-type: none"> • Umweltabgaben⁹⁷ <p><i>z.B. Energiesteuer (Ökosteuer), Mineralölsteuer, CO₂-basierte Kfz-Steuer, Zulassungssteuer (Kaufsteuer, Maluszahungen „fees“)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Umweltzertifikate • Umweltsubventionen <p><i>z.B. Bonuszahlungen „(re)bates“, Verschrottungsprämien</i></p> <p>Ohne staatliches Bewirtschaftungskonzept</p> <ul style="list-style-type: none"> • Privatisierungsmodelle • Umwelthaftungsrecht 	<ul style="list-style-type: none"> • Umweltmanagement (Öko-Audit), <i>z.B. Umweltfreundliche Beschaffung (green procurement)</i> • Betriebliche Umweltrechnungslegung • Ökologisches Marketing <i>z. B. Öko-Etikettierung</i> • Kooperationslösungen <i>z.B. Quotenzusagen, Freiwillige Selbstverpflichtungen</i> • Umweltzeichen <i>z.B. Verbraucherinformationen, Energieeffizienzrichtlinie</i> • Suasorische Instrumente <i>z.B. Fahrertraining</i>

Die Instrumente sollten aus makroökonomischer Sicht bestimmte Kriterien erfüllen: Effizienz, ökologische Treffsicherheit und dynamische Anreizwirkung. Die mikroökonomischen Wirkungen auf das Einzelunternehmen können davon abweichen.

Ökonomische Effizienz drückt die Fähigkeit eines Instruments aus, das vorgegebene Umweltziel mit minimalen Kosten zu erreichen. Unter *ökologischer Treffsicherheit* beziehungsweise Effektivität wird die Eignung eines Instruments verstanden, einen vorgegebenen Zielwert exakt zu erreichen. Die Effekte umweltpolitischer Instrumente werden in der neoklassischen Umweltökonomie zudem nach dem Kriterium der ‚*dynamischen Anreizwirkung*‘ bemessen. Es wird dabei wohlfahrtstheoretisch untersucht, inwieweit Anreizsysteme Impulse zur Entwicklung neuer und zur Weiterentwicklung bestehender Techniken geben können [Endres 2000, S. 121, 142ff.; Hemmelskamp 1999, S. 27; Stephan und Ahlheim 1996, S. 85f.].

3.3.2 Umweltauflagen

3.3.2.1 Umweltauflagen in der ökonomischen Theorie

Umweltauflagen in Form von Ge- und Verboten folgen dem Verursacherprinzip und sind direkte umweltbezogene Rechtsvorschriften. Gebote zielen darauf ab, bestimmte Umweltbelastungen zu verringern. Verbote dagegen sollen bestimmte Tätigkeiten unterbinden. Der Staat kontrolliert hierbei die Einhaltung der Auflagen und bestraft die Nichteinhaltung. Das Ordnungsrecht orientiert sich bei der Festlegung quantitativer Emissions(höchst)werte an bestimmten Emissionsquellen und dem aktuellen Stand der Technik [Tischler 1994; Kemfert 1998, S. 29; Altmann 1997, S. 123]. Umweltauflagen lassen sich an den Prozeßschritten an-

⁹⁷ Die Steuer unterliegt im Gegensatz zur Abgabe keiner Zweckbindung. Im Folgenden wird nur die Einnahmenseite betrachtet, sodaß die beiden Begriffe übereinstimmend verwendet werden [Fritsch et al. 1996, S. 93].

setzen, an denen Ge- und Verbote ansetzen: Input- und Outputauflagen sowie Prozeßnormen (siehe Abbildung 3-2):

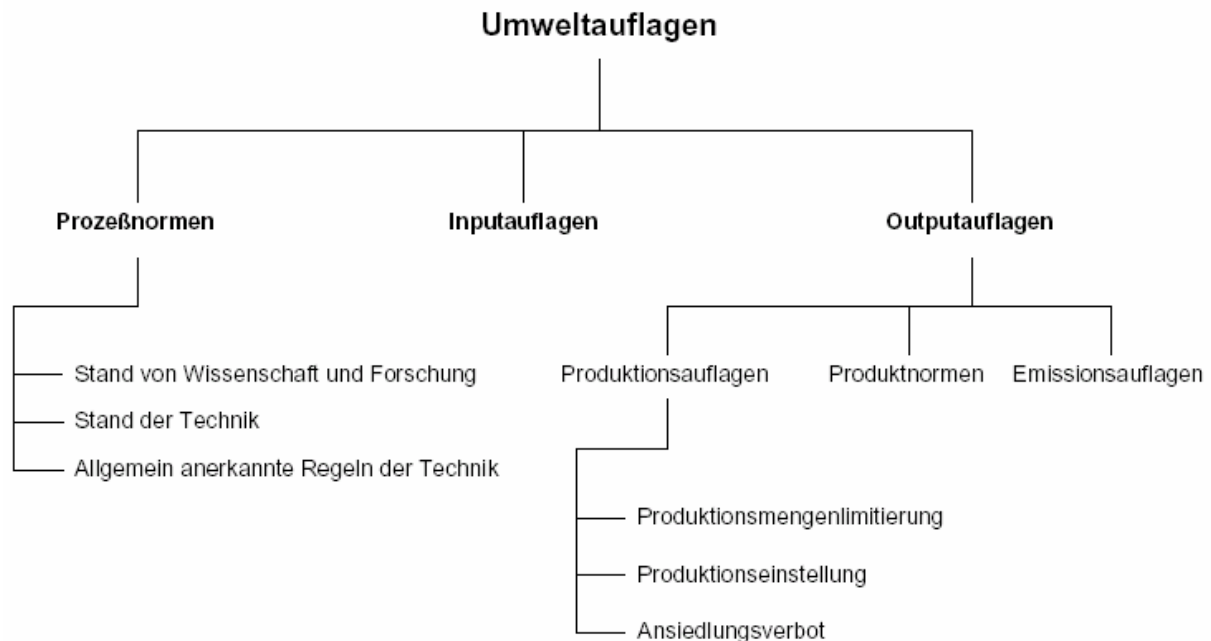


Abbildung 3-2: Einordnung von Umweltauflagen [Hemmelskamp 1999, S. 28]

Prozeßnormen richten sich nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik, dem aktuellen Stand der Technik oder dem Stand von Wissenschaft und Forschung und regeln den Gebrauch von Produktions- und Reinigungstechnologien (z. B. Dreiwegekatalysator).⁹⁸ Inputauflagen schreiben die Verwendung bestimmter Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe vor oder verbieten diese (z.B. schwefelfreie Kraftstoffe). Outputauflagen können zum einen bei den hergestellten Gütern oder bei den Emissionen ansetzen. Bei Gütern ist zwischen Mengenlimitierungen und Produktnormen zu unterscheiden. Bei Anwendung von Mengenlimitierungen reglementiert der Staat die Herstellung bestimmter Güter. Umweltbezogene Produktnormen zielen darauf ab, die durch den Verbrauch der betreffenden Güter verursachten Umweltbelastungen zu reduzieren. Durch absolute und relative Emissionsnormen legt der Staat die pro Zeiteinheit und Emissionsquelle maximal zulässige Schadstoffmenge und -konzentration fest. So ist die ‚Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA-Luft)‘ beispielsweise eine relative Begrenzung von Umweltbelastungen und gilt vorrangig für nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) genehmigungsbedürftige Anlagen [Wicke 1991, S. 169; Endres 1994, S. 102f.; Michaelis 1996, S. 27].

⁹⁸ Der Stand von Wissenschaft und Forschung definiert die fortschrittlichsten der in Entwicklung befindlichen Technologien. Der Stand der Technik fordert, daß die fortschrittlichsten, bereits mit Erfolg im Betrieb erprobten Technologien zur Anwendung kommen. Allgemein anerkannte Regeln der Technik fordern den Einsatz von Technologien, welche die Mehrzahl der Betreiber ähnlicher Produktionsanlagen bereits nutzen und die wirtschaftlich vertretbar sind [Endres 198].

Umweltauflagen sind *ökologisch treffsicher*, da bestimmte Gefahren direkt beseitigt und erwünschte Verhaltensweisen erzwungen werden. Zudem ist die Reaktion der Verursacher leichter abzuschätzen als bei steuerlichen Lösungen. Gleichwohl stellt sich das Problem der richtigen Eingriffsintensität, weil die vollständige Verhinderung eines Umweltschadens nur in Ausnahmefällen wohlfahrtsoptimal ist. Auch unter dem Kriterium der *ökonomischen Effizienz* ist die richtige Dosierung von Umweltauflagen nicht einfach. Die Vermeidungskosten der einzelnen Verursacher unterscheiden sich meist voneinander, sodaß Ge- und Verbote im Zweifel für jeden Emittenten einzeln festgeschrieben werden müßten. Bei der Entwicklung neuer Technologien verändern sich auch die Vermeidungskosten, was wiederum eine Angleichung der Umweltauflagen erfordert. Ge- und Verbote haben schließlich keine *dynamische Anreizwirkung*, da Restemissionen, d.h. Emissionen die unterhalb der gesetzten Norm liegen, für den Emittenten keine Kosten verursachen. Es bestehen also geringe Anreize zur Entwicklung und Anwendung neuer Vermeidungs- und Beseitigungstechnologien [Wicke 1991, S. 169ff.; Endres 1994, S. 118ff.; Fritsch et al. 1996, S. 92f.]. In Bezug auf die politische Durchsetzbarkeit ist die Umweltauflage als bekanntes Instrument für die Bürokratie leicht umzusetzen, unter anderem auch weil der umweltbewußten Bevölkerung die verursacherbezogene Umweltauflage meist unmittelbar einsichtig erscheint [Altmann 1997, S. 148f.].

3.3.2.2 Umweltauflagen im Verkehrssektor

Im Verkehrsbereich gibt es viele Beispiele für Umweltauflagen. Hierbei geht es in der Hauptsache um

- Grenzwerte für Schadstoffemissionen und Verbrauch
- Geschwindigkeitsbegrenzungen
- Fahrbeschränkungen und
- Grenzwerte für Kraftstoffqualitäten und
- Technische Vorgaben (Prozeßnormen)

Die Emissionsgrenzwerte und Verbrauchsstandards im Verkehrsbereich wurden bereits in Abschnitt 2.4 der politisch-rechtlichen Rahmenbedingungen ausführlich erläutert. Gleichzeitig gelten nach der EU-Richtlinie 1999/30/EG ab 2005 (2010) strenge Immissionsgrenzwerte für Luftschadstoffe in Ballungszentren mit dem Ziel einer Minderung der Partikel- und NO_x-Emissionen [UBA 2003c; ADAC 2004a, S. 35f.; AMS 2005c; Lucius 2006].

Emissionsstandards sind verbindlich und damit ein sehr wirksames Werkzeug, um die umweltpolitischen Ziele zu erreichen. Gleichwohl fehlt bei Schadstoffnormen nach ‚Stand der Technik‘ der Anreiz, über die Grenzwerte hinaus Verbesserungen zu erzielen. Die schrittweise Verschärfung wirkt dem entgegen. Dasselbe gilt auch für Emissions- oder verbrauchsbezogene Flottenstandards, die ein für die gesamte Fahrzeugflotte ermittelter Durchschnittswert sind, und den Herstellern damit ein höheres Maß an Flexibilität einräumen. Die Kosten der Hersteller zur Einhaltung der Emissionsstandards und Verbrauchsnormen ihrer Fahrzeugflotten weichen hierbei jedoch erheblich voneinander ab, was die Unternehmen demzufolge un-

terschiedlich belastet. So hat ein Hersteller von Premium- und Oberklassefahrzeugen aufgrund seines Produktportfolios größere Schwierigkeiten, die Normen einzuhalten, als ein Hersteller von Fahrzeugen der unteren Mittelklasse [Münch 1995, S. 222f., 225].

Nach dem ‚Gesetz zur Verminderung von Luftverunreinigungen durch Bleiverbindungen in Ottokraftstoffen für Kraftfahrzeugmotoren (‚Benzinbleigesetz‘ BzBIG)‘ von 1971 und einer EG-Richtlinie von 1978, besteht seit 1988 ein Verbot von verbleitem Normalbenzin und seit 2000 ein Verbot von verbleitem Superbenzin. Neben der Begrenzung der Schadstoffemissionen im Abgas werden auch neue Anforderungen (Schwefelgehalt) an die verschiedenen Kraftstoffarten eingeführt (siehe Abschnitt 2.4). So regelt die Richtlinie 98/70/EG die Qualitätsnormen für Otto- und Dieselmotoren. Die Vor- und Nachteile hinsichtlich Zielerreichung, mangelnder Flexibilität und Effizienz sowie Wettbewerbsprobleme gelten auch hier [UBA 2003c]. Auf lange Sicht ist wegen der begrenzten Verfügbarkeit der fossilen Energieträger der Einsatz von Biokraftstoffen wie auch von Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen beziehungsweise von anderen regenerativen Energieträgern im Verkehrsbereich notwendig. Mit der Richtlinie 2003/30/EG hat die EU eine Substitution von fossilen Kraftstoffen durch Biokraftstoffe in drei Schritten beschlossen. Im Jahr 2005 sollen 2 Prozent, im Jahr 2010 bereits 5,75 Prozent und im Jahr 2020 20 Prozent des Kraftstoffbedarfes aus Biokraftstoffen gedeckt werden [SRU 2005, S.184f]. Als Biokraftstoffe werden hierbei Kraftstoffe bezeichnet, die aus Biomasse erzeugt werden, zu denen sowohl heutige konventionelle Biokraftstoffe wie Biodiesel, Bioethanol oder Pflanzenöle als auch zukünftig verfügbare synthetische Biokraftstoffe gezählt werden. Die Zielsetzung für das Jahr 2010 kann erreicht werden, wenn die flächenertragsstarke Ethanolherzeugung aus Zuckerrüben die Biodieselerzeugung ergänzt [SRU 05, S.196]. In Deutschland dürfen seit dem 1.Januar.2004 bis zu 5 Prozent Biokraftstoff dem normalen Dieselmotorenkraftstoff hinzugefügt werden. Bis 2025 könnten rund 25 Prozent der Kraftstoffe für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren aus Biomasse hergestellt werden [IFMO 2005]. Optimistische Schätzungen sagen für 2030 voraus, daß bis dahin 40 bis 50 Prozent des Diesels und 20 bis 30 Prozent des Ottokraftstoffes aus Biomasse hergestellt werden könnte [Behlmer und Wanke 2003, S.15].

Kraftstoffverbrauch und Luftschadstoffe nehmen mit erhöhter Geschwindigkeit überproportional zu, so daß auch Geschwindigkeitsbegrenzungen in der Diskussion stehen. So führen Kommunen lokale Geschwindigkeitsbegrenzungen ein und Umweltverbände fordern ein allgemeines Tempolimit inner- und außerorts. Die erzielten Minderungen sind mit Ausnahme der CO₂-Emissionen gering – und das bei hohem Kontrollaufwand, Fahrzeitverlängerungen und gesamtwirtschaftlichen Produktionseinbußen [Schäfer 2005b; Münch 1995, S. 226].

Fahrbeschränkungen sind ein Werkzeug, um lokalen Schadstoffkonzentrationen mit einfachen administrativen Mitteln entgegenzutreten. Hierbei geht es aber in der Hauptsache um kurzfristige Belastungsspitzen. Seit 1995 besteht in Deutschland eine sogenannte Sommersmog-

Verordnung, die es bestimmten Fahrzeugen verbietet, bei lokaler Überschreitung vorher festgelegter Ozonwerte in die Innenstädte zu fahren [Altmann 1997, S. 297f.]. Zur Einhaltung von Grenzwerten für Luftschadstoffe setzen Kommunen lokale Innenstadtsperren und Maut-Gebühren ein (z.B. London, Stockholm, Tokio, Berlin) [UBA 2003c; ADAC 2004a, S. 35f.; AMS 2005c; Lucius 2006]. Hierbei kommt es auf eine nach Schadstoffklassen und Fahrzeugtypen⁹⁹ abgestufte Instrumentenkombination an, um negative Auswirkungen von Fahrverboten klein zu halten [Münch 1995, S. 227; Tokyo Metropolitan Government 2002a, S. 7ff.]. Die Maut ist aus verkehrswissenschaftlicher Perspektive ein Standard-Preis-Ansatz, da auf die Ermittlung eines (wohlfahrtsökonomischen) Optimums verzichtet wird. Vielmehr betrachtet die Politik ein bestimmtes Verkehrsaufkommen als akzeptabel und erreicht dieses mittels einer schrittweise variierenden Bepreisung der Straßenbenutzung. Entspricht die Gebühr dagegen – vergleichbar der Pigou-Steuer – den Grenzkostenpreisen zur Internalisierung der Externalitäten, stellt sich das gesellschaftliche Optimum auch ein [Borrmann und Peistrup 2004, S. 488].

Die Reduktion von Partikelemissionen bei Dieselfahrzeugen kann mittels einer Ausrüstungspflicht für Partikelfilter in neuzugelassenen Dieselfahrzeugen erreicht werden – vergleichbar mit der Einführung von Katalysatoren in den 1980er Jahren. Die deutschen Bundesländer gehen davon aus, daß es ohne einschneidende Maßnahmen auch in den Jahren bis 2010 zu Überschreitungen der Partikelgrenzwerte kommen wird [SRU 2005, S.150]. Mit der Einführung einer solchen Maßnahme wird auch der Druck auf die Automobilindustrie erhöht, die freiwillige Zusage einer Ausrüstung der gesamten Fahrzeugflotte im Jahr 2008 einzuhalten. Spätestens mit dem Inkrafttreten der EU-5-Norm wird der Einsatz eines solchen Partikelfilters aufgrund der strengeren Grenzwerte für Partikelemissionen unumgänglich sein. Das ordnungspolitische Instrument der Ausrüstungspflicht ist demnach immer im Zusammenhang mit dem Instrument der Emissionsnormen zu betrachten und zeitlich aufeinander abzustimmen. Die Einführung einer Partikelfilterpflicht für alle sich im Betrieb befindenden Fahrzeuge ist jedoch nicht sinnvoll, da hier technische Restriktionen einer Umsetzung vor allem bei der Nachrüstung älterer Fahrzeuge im Wege stehen und somit die Akzeptanz eines solchen ordnungspolitischen Instrumentes stark reduzieren. Hier stellt der Einsatz eines ökonomischen Anreizinstrumentes die bessere Lösung dar [Doemens 2005].

3.3.3 Umwelthaftung

Die Umwelthaftung hat konkrete Regelungen zur Durchsetzung des Verursacherprinzips zum Inhalt. Das Haftungsrecht umfaßt Regeln, die festlegen, unter welchen Voraussetzungen und in welchem Umfang der Verursacher den Geschädigten durch entsprechende Vergütung zu kompensieren hat. Dabei kann sich der Haftungsumfang auf alle materiellen und immateriellen

⁹⁹ In japanischen Ballungsräumen gelten die Beschränkungen zum Beispiel für ältere Diesel-LKW [Tokyo Metropolitan Government 2002a, S. 7ff.].

len Schäden beziehen. Beim Haftungsmaßstab kommen die Gefährdungs- und Verschuldenshaftung in Frage [Kemfert 1998, S. 46; Altmann 1997, S. 140f.]:

- Die *Gefährdungshaftung* drückt aus, daß der Verursacher für den Umweltschaden zu haften hat, unabhängig davon, ob ihn ein Verschulden trifft oder nicht. Hierbei kommt es bereits zur Schadensersatzpflicht, wenn eine Handlung einen objektiven Schaden verursacht hat.
- Bei der *Verschuldenshaftung* muß der Verursacher den Schaden erst ersetzen, wenn ein nachweisbarer Ursache-Wirkungs-Zusammenhang besteht; er wird von der Ersatzpflicht frei, wenn er den Schaden weder vorsätzlich noch fahrlässig begangen hat.

Die nicht mehr zurechenbaren beziehungsweise nicht über den Verbraucher aufzubringenden Kosten trägt indes oft die Öffentlichkeit, so daß in diesem Falle das *Gemeinlastprinzip* gilt. Hinsichtlich der *ökonomischen Effizienz* der Umwelthaftung ist die Frage zu beantworten, inwieweit Unternehmen Aktivitäten zur Schadensverhinderung zu minimalen Kosten erreichen. Bei der Gefährdungshaftung versucht jeder Verursacher, seine Sorgfaltskosten und die zu erwartenden Umweltschäden zu reduzieren (ökonomisch effizient). Bei einer Verschuldenshaftung macht die oft schwierige Zuordnung der Verursacher von Umweltbelastungen eine Durchsetzung der Umwelthaftung schwierig (ökonomisch ineffizient). Gleiches gilt für die *ökologische Treffsicherheit* von Verschuldens- und Gefährdungshaftung [Kemfert 1998, S. 47; Fritsch et al. 1996, S. 92f.]. Da bei der Verschuldenshaftung der Verursacher bei fehlendem Ursache-Wirkungs-Zusammenhang von den externen Kosten entlastet wird, ist der *dynamische Anreiz* gering, nach neuen Methoden zu suchen, mit denen sich die Sorgfaltskosten zur Erreichung eines bestimmten zu erwartenden Schadensniveaus senken lassen. Mit der vollen Ersatzpflicht bei Gefährdungshaftung entwickelt sich dagegen ein Anreiz, negative externe Effekte in das unternehmerische Kalkül mit einzubeziehen [Fritsch et al. 1996, S. 113ff.].

Das 1991 in Deutschland eingeführte Umwelthaftungsgesetz (UmweltHG) sieht die Gefährdungshaftung vor und bezieht sich auf (ökologische) Schäden, die einzelnen Personen entstehen. Der Ausbau der Umweltpolitik mit Hilfe des Haftungsrechts ist auch in Japan erfolgt. Auslöser war die in den fünfziger und sechziger Jahren auftretende Luft- und Gewässerverschmutzung, die zu erheblichen Gesundheitsschäden führte (siehe Abschnitt 2.5.2). In Japan wurde in vier großen und für die Kläger erfolgreichen Umweltprozessen zwischen 1967 und 1973 an die Stelle der Verschuldenshaftung das Prinzip der Gefährdungshaftung gesetzt, was die wichtige Rolle des „Richterrechts“ im Gegensatz zur Ausgestaltung durch Gesetze belegt. Die Gerichte haben den Geschädigten Beweiserleichterungen zugestanden. So akzeptierten diese statistische Untersuchungen anstatt detaillierter Kausalitätsnachweise zwischen Schadstoffemissionen (NO_x, PM) und den sich daraus ergebenden Erkrankungen (Lungenkrebs, Asthma). Im Gegenteil, die Betriebe mußten selbst den (Entlastungs-)Nachweis führen, um

nicht schadensersatzpflichtig zu werden. Insgesamt führte dies zu erheblichen Schadenersatzzahlungen und zur Entwicklung neuer Umwelttechniken [Kirchgässner 1995, S. 288; Mainichi Shinbun 2002; Environmental Health Department 1997]. Aufgrund der vielen einzelnen Emittenten im Verkehrsbereich sind Umweltbelastungen nicht direkt zurechenbar und ein Haftungsrecht nicht anwendbar.

3.3.4 Umweltabgaben und -subventionen

3.3.4.1 Umweltabgaben und -subventionen in der ökonomischen Theorie

Der unmittelbaren Verhaltensvorschrift einer Umweltauflage steht der indirekte Ansatz der Umweltabgabe oder Umweltsubvention gegenüber. Letztere kann auch in Form von Steuererleichterungen erfolgen. Hier sind umweltbelastende Aktivitäten nicht direkt begrenzt, sondern die emittierte Menge eines Schadstoffes, die eingesetzte Menge eines Produktionsfaktors oder die produzierte Endproduktmenge verteuert sich für den Verursacher. Mit einem festgelegten Preis der Umweltnutzung stehen Abgaben im Spannungsfeld von fiskalischen Interessen zur Erhöhung von Staatseinnahmen und Lenkungsinteressen zur Vermeidung oder Verringerung von Umweltbelastungen. Um die durch die Lenkungswirkung ausgelösten Einnahmeverluste auszugleichen, muß daher eine kontinuierliche Anpassung an den ‚Stand der Technik‘ erfolgen. Umweltabgaben lassen sich in Input-, Output und Verfahrensabgaben unterteilen (siehe Abbildung 3-3) [Endres 2000, S. 119; Tischler 1994; Hemmelskamp 1999, S. 31; Münch 1995, S. 230].

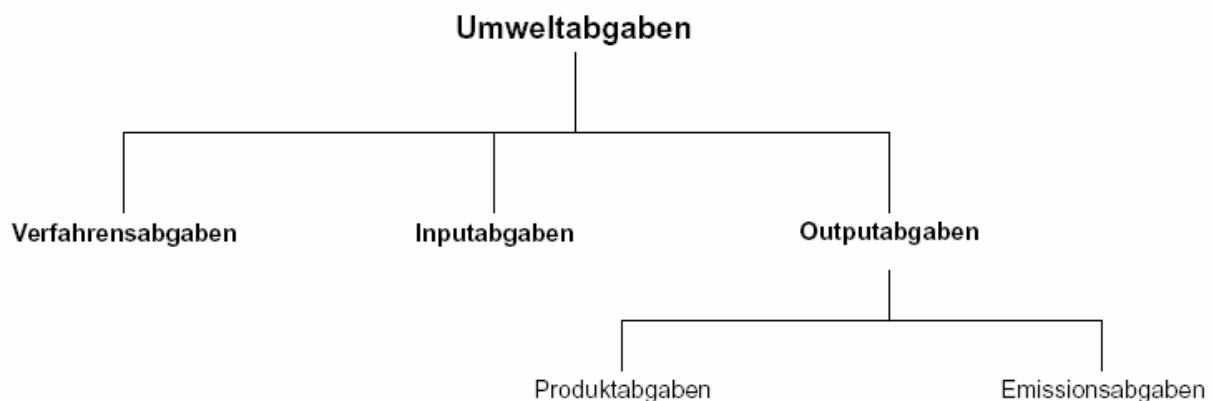


Abbildung 3-3: Systematik der Umweltabgaben [Hemmelskamp 1999, S. 31]

Weiterhin stellt sich die Frage, ob die Abgaben und Subventionen als ‚Steuern‘ oder ‚Sonderabgaben‘ gestaltet werden sollen. Steuern fließen dem allgemeinen Haushalt zu, während Sonderabgaben zweckgebunden sind. Sonderabgaben stehen jedoch in der Regel im Konflikt mit dem ‚Nonaffektationsprinzip‘, nach dem die gesamte Summe der öffentlichen Einnahmen zur Deckung der öffentlichen Ausgaben dienen sollen. Als Sonderabgaben werden diese zweckgebundenen Finanzmittel in einem Sonderfond aus dem regulären Haushalt ausgelagert. Daher sind sie möglichst aufkommensneutral zu gestalten. Das Problem hierbei ist, daß sich eine erfolgreiche Lenkungsabgabe durch eine im zeitlichen Verlauf sinkende Einnahme aus-

zeichnet. Dies steht wiederum der fiskalischen Eigenfinanzierungsforderung gegenüber [Michaelis 1996, S.147]. Die folgenden Ausführungen behandeln Abgaben daher als ‚Steuern‘, die in das allgemeine Haushaltsbudget fließen; die Begriffe Abgaben und Steuern werden synonym verwendet.

Unternehmen vergleichen die Vermeidungskosten mit der zu zahlenden Abgabe. Unternehmen mit niedrigen Vermeidungskosten entscheiden sich dann für die Reduzierung von Umweltbelastungen, Unternehmen mit hohen Vermeidungskosten für die Zahlung der Steuer. Bei Umweltabgaben erfolgt so eine kostenminimale (*ökonomisch effiziente*) Aufteilung des angestrebten Reduktionsziels innerhalb des Verursacherkreises. Die Umweltsteuer fixiert also den Preis der Umweltnutzung, überläßt aber die Entscheidung über die – zu besteuernde - Menge dem Marktmechanismus. Der Staat muß also sowohl den Preis des Umweltgutes festsetzen, als auch die Reaktionen der Verursacher auf den Steuersatz einschätzen (‚Preiselastizität‘). Die *ökologische Treffsicherheit* von Umweltsteuern leidet so darunter, daß die Zielwerte nur mittelbar über das Anpassungsverhalten der von der Abgabe betroffenen Unternehmen zu erreichen sind. Diese passen die Grenzvermeidungskosten an den Steuersatz an (Gewinnmaximierung). Die zielführende Festlegung des Steuersatzes erfordert ausreichenden Einblick in die Vermeidungskosten der Verursacher. Schätzfehler sind unausweichlich. Die Politik über- oder unterschreitet das Umweltziel je nach wirtschaftlicher Lage. Gleichwohl führen Umweltsteuern (meist) zu einem *dynamischen Anreiz* zur Entwicklung neuer Umwelttechniken. Unter der Voraussetzung, daß die Investitionskosten in neue Techniken unter dem Steuersatz liegen, drückt jede vermiedene Emissionseinheit einen Gewinn aus [Endres 2000, S. 124ff.; Altmann 1997, S. 144ff.].

Umweltsubventionen sind aufgrund von Mitnahmeeffekten und der Zurückstellung von privaten Investitionen ökonomisch nicht effizient und ökologisch nicht treffsicher. Wegen der dynamischen Anreizwirkung sollten sie daher nur bei kurzfristigen Umweltschutzinvestitionen zum Einsatz kommen [Benkert et al. 1991, S. 69]. Mit Umweltabgaben werden häufig Ausweichmöglichkeiten (Zahlung der Abgabe statt Umweltschutz) verknüpft. Insbesondere in unteren Einkommensschichten stößt das Instrument wegen der direkten Übertragbarkeit auf Konsumgüterpreise (Steuerinzidenz¹⁰⁰) auf Ablehnung [Altmann 1997, S. 149].

3.3.4.2 Ökosteuer als Verbrauchssteuer im Verkehrssektor

Im Verkehrsbereich gibt es viele Beispiele für Umweltabgaben. Die Zusatzbesteuerung des Kraftstoffes wirkt sich über den Lebenszyklus insbesondere in der Nutzungsphase des Fahrzeugs aus. Diese Ökosteuer zielt auf eine Förderung von Fahrzeugen mit niedrigem Verbrauch sowie mittelfristig auf den Ersatz von Fahrzeugen mit hohem Verbrauch und bietet

¹⁰⁰ Die Steuerinzidenz untersucht, wer die Steuer letztlich trägt, fragt also nach der Belastungswirkung.

einen Anreiz zum kraftstoffsparenden Fahren. Eine dauerhafte und vorhersehbare Erhöhung der Kraftstoffpreise mittels Steuern gibt Herstellern und Nutzern zudem ausreichend Zeit für Anpassungsreaktionen.

Die Energiebesteuerung erfolgt in Deutschland vorrangig durch die Mineralölsteuer. Das Mineralölsteuergesetz (MinölStG) regelt die Besteuerung von Kraft- und Heizstoffen. Die Mineralölsteuer allein hat jedoch keinen direkten ökologischen Lenkungsbezug. Vielmehr trägt sie heute mit einem jährlichen Aufkommen von rund 42 Mrd. EUR einen erheblichen Anteil zur Finanzierung des Bundeshaushaltes bei und ist die für den Staat bedeutendste Verbrauchsteuer [BMF 2006a].

Um eine ökologische Lenkungswirkung zu entfalten, wurden die Steuersätze im April 1999 durch die erste Stufe der Ökologischen Steuerreform (ÖSR) um 3,07 Cent/l erhöht. Zudem wird seit diesem Zeitpunkt Strom mit 1,02 Cent/kWh besteuert. Der Grundbetrag der Mineralölsteuer ist seit diesem Zeitpunkt festgesetzt, während die Ökosteuer variiert werden darf. Für zukünftige fiskalische und Lenkungsinteressen soll zukünftig ausschließlich der Steuersatz der Ökosteuer angepaßt werden. Weitere Stufen für Kraftstoffe und Strom sind im Dezember 1999 im Rahmen des Gesetzes zur Fortführung der Umweltsteuer für die Jahre 2000 bis 2003 beschlossen worden. Seit dem 1. Januar 2003 beträgt der Steuersatz pro Liter Benzin und Dieselkraftstoff 15,34 Cent pro Liter [BMF 2006a]. Bei einem gesamten Steuersatz von 65,45 Cent pro Liter Benzin beträgt der Grundbetrag der Mineralölsteuer folglich 50,11 Cent pro Liter. Bei Dieselkraftstoff beträgt der gesamte Steuersatz 47,04 Cent pro Liter, womit 31,7 Cent pro Liter Dieselkraftstoff auf den Grundbetrag der Mineralölsteuer entfallen (siehe auch Tabelle 3-2) [BMF 2004, S.7; UBA 2003g; UBA 2003h].

Tabelle 3-2: Mineralöl- und Stromsteuersätze im Rahmen der Ökologischen Steuerreform (ÖSR) [UBA 2003g; BMF 2006b]

Energie-träger ¹		ohne ÖSR	1. Stufe	2. Stufe	3. Stufe	4. Stufe	5. Stufe
		bis 31.03.1999	ab 1.04.1999	ab 1.01.2000	ab 1.01.2001	ab 1.01.2002	ab 1.01.2003
Benzin ²	EUR/ 1000l	501,07	531,74	562,42	593,10	623,80	654,50
Diesel ³	EUR/ 1000l	317,00	347,68	378,36	409,03	439,70	470,40
Erdgas	EUR/ MWh	1,84	3,48	3,48	3,48	3,48	5,50
Strom	EUR/ MWh		10,23	12,78	15,34	17,90	20,50
Anm.: Die bis zum 1.01.2002 geltenden DM-Steuersätze sind hier zum Vergleich in EUR umgerechnet.							
¹ Mineralöl- und Stromsteuer für wichtige Energieträger (ohne Berücksichtigung von Sonderregelungen)							
² ab 1.11.2001 schwefelarm, ab 0.01.2003 schwefelfrei							
³ Die Angleichung der Mineralölsteuer (Otto-, Dieselkraftstoff) ist in der politischen Diskussion [UBA 2003h]							
Quelle: Bundesministerium der Finanzen							

CO₂-neutrale Biokraftstoffe sind von der Mineralölsteuer bis einschließlich 2009 ausgenommen. Auf eine weitere Berücksichtigung anderer anfallender Emissionen bei der Herstellung der jeweiligen Biokraftstoffe wird verzichtet. Auch Unterschiede zwischen den verschiedenen Biokraftstoffen werden nicht weiter berücksichtigt. Kraftstoffmischungen sind zu dem Anteil von der Mineralölsteuer befreit, zu dem sie aus Kraftstoffen aus Biomasse bestehen [SRU 2005, S.260]. Kraftstoffe mit einem Schwefelgehalt von mehr als 50 ppm werden ab dem

1.11.2001 und von mehr als 10 ppm¹⁰¹ seit dem 1.01.2003 zusätzlich mit 1,53 Cent/l besteuert [UBA 2003g].

Das relativ günstige Erdgas unterliegt bis 2020 einem niedrigeren Steuersatz, Flüssiggas wegen seines höheren Kohlenstoffgehaltes bis 2009. Da der Energiegehalt von einem Kilogramm Erdgas dem von 1,5 Litern Benzin (Euro Super 95) entspricht, berechnet sich der Steuersatz für den Grundbetrag zu 12,37 Cent pro kg und zu 5,71 Cent pro kg als Steuersatz für die Ökosteuer, akkumuliert 18,08 Cent pro kg Erdgas [SRU 2005, S.260].

Die stufenweise Anhebung der Steuersätze sorgt durch ökonomische Anreize für den sparsamen Umgang mit Energie. Mit den Energiesteuern erhöhen sich die Steuereinnahmen, die über eine Senkung bzw. Stabilisierung der Rentenversicherungsbeiträge an Unternehmen und private Haushalte zurückfließen [UBA 2003g]. Kurzfristig ist die Lenkungswirkung wegen der geringen Preiselastizität der Kraftstoffnachfrage gering. Langfristig jedoch reagieren Hersteller und Fahrzeugnutzer auf höhere Kraftstoffpreise mit einem Angebot verbrauchsgünstigerer Fahrzeuge, verändertem Kaufverhalten und verminderter Nutzungsintensität. Der Ausstoß von NO_x- und Partikelemissionen hängt wesentlich von der Abgasreinigungstechnik ab, so daß eine Verbrauchssteuer keine Lenkung verspricht. Ausweichreaktionen, wie zum Beispiel „Tanktourismus in grenznahen Regionen“, sind eher vernachlässigbar [Münch 1995, S. 233f.; Weizsäcker et al. 1992, S. 34ff.; Benkert 1991, S. 156ff.].

Die aus Sicht der Politik mit der ökologischen Steuerreform erzielten Erfolge finden auch das Interesse Japans, das noch vor erheblichen Herausforderungen zur Erfüllung der Kyoto-Vorgaben steht [BMU 2005; VTT 2006, S. 8]. Nach Hayashi bewirkt die Einführung einer verbrauchsabhängigen Ökosteuer eine Reduzierung der Fahrleistung und ein effizienteres Fahrverhalten [Hayashi et al. 2000, S. 13]. Tabelle 3-3 stellt die derzeit gültigen japanischen PKW-Steuern auf den Betrieb eines Fahrzeugs dar:

Tabelle 3-3: Übersicht der PKW-Steuern in Japan (Betrieb) [JAMA 2003a, S. 21]

	Steuerkategorie	national/ regional	Steuerrate
Steuer auf den Betrieb eines Fahrzeugs	Mineralölsteuer Benzin	national	53,8 JPY/l
	Mineralölsteuer Diesel	regional	32,1 JPY/l
	Mineralölsteuer LPG	national	17,5 JPY/l

3.3.4.3 Kfz-Steuer als Besitzsteuer im Verkehrssektor

Die jährliche Kraftfahrzeugsteuer besteuert die ‚Fahrzeughaltung‘, ist also unabhängig von der Nutzungsintensität des Fahrzeugs und gründet sich seit dem 1. Juli 1997 auf eine emissionsorientierte Bemessungsgrundlage. Die Einnahmen fließen in die jeweiligen Länderhaushalte [SRU 2005, S. 179, 195]. Die Kfz-Steuer besitzt ein Lenkungspotential zur Herstellung

¹⁰¹ parts per million (ppm.): Bezeichnung zur Angabe des Anteils einer Substanz in 1.000.000 Teilen der Gesamtschubstanz [Meyer 1997].

und zum Kauf von umweltfreundlichen Fahrzeugen sowie zur Umrüstung und Stilllegung älterer Fahrzeuge mit hohem Schadstoff- und CO₂-Ausstoß. Anders als die Mineralölsteuer erlaubt die Kfz-Steuer eine Differenzierung nach den technischen Fahrzeugeigenschaften.

Im Zuge der EU-Harmonisierung und im Sinne der EU-Strategie zur Minderung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen soll sich die Kraftfahrzeugsteuer bis 2008 nicht mehr wie bisher am Hubraum, sondern an den CO₂-Emissionen orientieren. Die Einführung in Deutschland erfolgt voraussichtlich am 1.07.2008 oder 1.01.2009 [BMF 2005; EU-Kommission 2002; SRU 2005, S. 179; Automobilwoche 2007, S. 6].¹⁰² Mit solch einem progressiven Steuertarif läßt sich die Lenkungswirkung der Steuer erhöhen, das heißt je geringer der spezifische Verbrauch und damit die CO₂-Emissionen eines Fahrzeugs sind, desto weniger Kfz-Steuer muß gezahlt werden. Diese Maßnahme wirkt nach Ansicht des Sachverständigenrates für Umweltfragen sowohl auf die Beschaffung kleinerer und mittlerer Fahrzeuge als auch auf den beschleunigten Austausch des Fahrzeugaltbestandes und höher motorisierter Fahrzeuge [SRU 2005, S. 179f.; AUDI 2005, UBA 2003h]. Fraglich ist indes, wie der Kohlendioxidausstoß älterer Fahrzeuge (gerichtsfest) bestimmt werden soll und ob sich die Länder, denen das Aufkommen aus der Kfz-Steuer in vielen Ländern zufließt, gegen eine Reform stellen (Aufkommensneutralität). Eine Umstellung der hubraumbezogenen auf eine CO₂-bezogene Kraftfahrzeugsteuer begünstigt verbrauchsarme Dieselfahrzeuge. Zur Minderung der aktuellen Feinstaub- und NO_x-Belastungen sind daher flankierende Maßnahmen erforderlich, da Grenzwerte, die erst zu einem späteren Zeitpunkt in Kraft treten, die Abgasprobleme nicht lösen. Österreich, die Niederlande, Frankreich und Deutschland diskutieren daher die steuerliche Förderung von neuen und/oder gebrauchten Dieselfahrzeugen mit Rußfiltern [SRU 2005, S. 159, 180; ADAC 2004b, S. 35; AMS 2005b].¹⁰³

Fraglich ist die Bewertung der CO₂-Emissionen im Hinblick auf die Kraftstoffsorte. Eine Berücksichtigung CO₂-neutraler Biokraftstoffe kann nur dann erfolgen, wenn diese flächendeckend verfügbar sind. Bei der Festlegung der Besteuerungsgrundlage für Elektrofahrzeuge stellt sich noch die Frage nach der Bemessungsgrundlage. Sollen nur die direkten Emission des Fahrzeugbetriebs berücksichtigt werden, so sind sie von der Kfz-Steuer freigestellt. Dies ist in eine starke Ausrichtung der Lenkungswirkung hin zu Elektroantrieben. Berücksichtigt man hingegen auch die bei der Wasserstoff- oder Stromerzeugung anfallenden Emissionen, so müßte auch die jeweilige Herkunft der benötigten Energie bekannt sein. Dies ist nur dann möglich, wenn ein einheitlicher Durchschnittswert für die Erzeugungsmethode antizipiert wird. Da die Zusammensetzung des Energiemix' in Zukunft nicht homogen sein dürfte, sondern regional oder gar fahrzeugspezifisch unterschiedlich ausfallen kann, ist eine Akzeptanz

¹⁰² Die spezifischen CO₂-Emissionen können bei gleichem Hubraum beträchtlich voneinander abweichen.

¹⁰³ ADAC-Vorschlag: 300 bis 600 EUR [ADAC 2004b].

einer solchen Bemessungsgrundlage äußerst fraglich. Daher wird in den folgenden Ausführungen angenommen, daß alle Elektrofahrzeuge von der Kfz-Steuer befreit sind.

In Japan gibt es neben der in Abschnitt 3.3.4.2 erläuterten Steuer auf den Fahrzeugbetrieb eine der deutschen Kfz-Steuer vergleichbare kombinierte Steuer auf die Anschaffung und den Besitz eines Fahrzeugs. Tabelle 3-4 gibt eine Übersicht der beiden PKW-Steuern.

Tabelle 3-4: Übersicht der PKW-Steuern in Japan (Anschaffung und Besitz) [JAMA 2003a, S. 21]

	Steuerkategorie	national/ regional	Steuerrate
Steuer auf die Anschaffung eines Fahrzeugs	Umsatzsteuer	national	5%
	Erwerbssteuer	regional	5%
Steuer auf den Besitz eines Fahrzeugs	Gewichtssteuer	national	6.300 JPY pro 0,5t (alle 2 Jahre)
	Automobilsteuer	regional	hubraumabhängig (zw. 29.500 JPY/Jahr und 111.000 JPY/Jahr)
	Kleinwagensteuer	regional	7.200 JPY/Jahr

3.3.4.4 Bonus- und Maluszahlungen im Verkehrssektor

Ein weiteres Instrument stellen die Bonus- und Maluszahlungen auf den Kaufpreis eines Fahrzeuges dar. In der englischsprachigen Literatur wird dieses Instrument auch als ‚feebate‘ bezeichnet, eine Kombination aus den Worten ‚fee‘ (Maluszahlung) und ‚rebate‘ (Rabatt, Bonuszahlungen). Die Grundidee dieses Instrumentes ist es, die Bonuszahlungen für emissionsärmere Fahrzeuge durch die Einnahmen aus den Maluszahlungen für Fahrzeuge mit höheren Emissionen zu finanzieren. Dieses Instrument stellt im Idealfall eine aufkommensneutrale Steuerdifferenzierung in Form einer Sonderabgabe (siehe Abschnitt 3.3.4.1: Sonderabgabe) dar, welche in einen eigenen Haushalt ausgelagert wird. Aufgrund der zu erzielenden Aufkommensneutralität wird diese Sonderabgabe nicht als zusätzliche Belastung durch Steuern aufgefaßt [Michaelis 1996, S. 30].

Dieses System ist besonders ansprechend, weil es eine Ergänzung der Marktkräfte darstellt, die Angebot und Nachfrage erzeugen. Die Höhe der Bonus- und Maluszahlungen könnte beispielsweise so festgelegt werden, daß sie den Emissionen der einzelnen Fahrzeugtypen entspricht. Werden hingegen die Mehrkosten des Kaufpreises für innovative Fahrzeuge durch dieses Instrument angeglichen, so hätte der Konsument die Freiheit, sich für jenes Fahrzeug zu entscheiden, welches seinen Anforderungen am besten entspricht, ohne sich von den unterschiedlichen Kaufpreisen bei seiner Entscheidungsfindung beeinflussen lassen zu müssen. Auch die Fahrzeughersteller wären in diesem idealen Fall von der Notwendigkeit befreit, die Zusammensetzung ihrer Fahrzeugflotten anhand des Profits der einzelnen Fahrzeugtypen auszurichten. Der Markt würde den Marktteilnehmern somit einen angemessenen Rückschluß auf ihre Kaufentscheidungen bezüglich der Umweltbeeinflussung geben. Hierdurch wären revolutionäre Marktentwicklungen hinsichtlich neuer Fahrzeugkonzepte und neuer Unternehmen zu erwarten [Ford 1999, S. 258f].

Ein weiterer Vorzug bei dieser Einsatzform des Instrumentes ist, daß die Förderung unabhängig von der Technologie und der Kraftstoffart des jeweiligen Fahrzeugtyps ist. Der Entscheidungsträger braucht keine Präferenzen für eine bestimmte Antriebstechnologie, da jede emissionsgünstige Technik entsprechend gefördert wird [Michaelis 1996, S. 94].

Die Lenkungswirkung dieses Instrumentes steht jedoch im Spannungsfeld zwischen der fiskalischen Forderung der Aufkommensneutralität, da bei einer optimalen Wirksamkeit dieses Instrumentes die Summe der Einnahmen sinkt während die Ausgaben stetig ansteigen. Damit der Haushalt der Bonus- und Maluszahlungen ausgeglichen ist, muß die Summe der jährlichen Bonuszahlungen den gleichen Betrag aufweisen wie die Summe der jährlichen Einnahmen aus den Maluszahlungen. Beide Summen sind direkt von der Anzahl der entsprechenden Fahrzeugkäufe im Jahr abhängig. Da jedoch die zukünftige Entwicklung der Verkaufszahlen zum Zeitpunkt der Festlegung der Bonus- und Maluszahlungen nicht bekannt ist und gleichzeitig auch von der gewählten Höhe der Zahlungen abhängt, ist die notwendige Anpassung dieser an die zu erwartenden zukünftigen Marktanteile problematisch. Aufgrund der vielen weiteren Einflußfaktoren ist eine exakte Prognose zukünftiger Marktanteile in der Regel nicht zu erwarten. Durch Beobachtungen aus zurückliegenden Jahren könnten jedoch im Laufe der Zeit genügend Erfahrungswerte gewonnen werden, um die Festlegung der jeweiligen Höhe der Bonus- und Maluszahlungen so zu bestimmen, daß die gewünschte Balance zwischen Lenkungswirkung und Aufkommensneutralität gefunden werden kann. Um die gewünschte Lenkungswirkung zu erzielen, ist es jedoch auch erforderlich, daß langfristig die Entwicklung der Zahlungen einer gewissen Vorhersehbarkeit genügt [Ford 1999, S. 263].

In Japan besteht seit April 2001 das ‚green tax system‘ als Bonussystem, das die kombinierte Kauf- und Kfz-Steuer je nach Modell, Verbrauch und Umweltverträglichkeit (in Bezug auf die Grenzwerte) festlegt und die Fahrzeuge mit Plaketten bezeichnet (siehe Abschnitt 2.4.5 und 3.3.6.3) [VTT 2001b; JAMA 2005a, S. 51]. Tabelle 3-5 stellt das Steueranreizsystem dar:

Tabelle 3-5: Steuervergünstigungen im ‚green tax system‘ [JAMA 2004a, S. 60]

Kennzeichnung	Bezeichnung	Voraussetzung	Steuervergünstigung	
			Automobile Tax	Acquisition Tax
Erste Stufe des 'green tax system' (April 2001 bis März 2004)				
One Star	Transitional Low Emission Vehicle (TLEV)	Schadstoffemissionen 25% unterhalb der 2000- Grenzwerte	2 Jahre 13% Steuernachlaß auf die Automobilsteuer	
Two Star	Low Emission Vehicle (LEV)	Schadstoffemissionen 50% unterhalb der 2000- Grenzwerte	2 Jahre 25% Steuernachlaß auf die Automobilsteuer	
Three Star	Ultra Low Emission Vehicle (ULEV) ¹⁰⁴	Schadstoffemissionen 75% unterhalb der 2000- Grenzwerte	2 Jahre 50% Steuernachlaß auf die Automobilsteuer	Hybrid-: 2,2% Erdgas-, Elektro-: 2,7%
Zweite Stufe des 'green tax system' (April 2004 bis März 2006)				
	Low Emission Vehicle (LEV)	Schadstoffemissionen 50% unterhalb der 2005- Grenzwerte	1 Jahr 25% Steuernachlaß auf die Automobilsteuer	10.000 JPY
		Kraftstoffeffizienzwerte 2010 um 5% übertreffen		
	Ultra Low Emission Vehicle (ULEV)	Schadstoffemissionen 75% unterhalb der 2005- Grenzwerte	1 Jahr 50% Steuernachlaß auf die Automobilsteuer	15.000 JPY
		Kraftstoffeffizienzwerte 2010 um 5% übertreffen		
		Kraftstoffeffizienzwerte 2010 erreichen	1 Jahr 25% Steuernachlaß auf die Automobilsteuer	10.000 JPY
Elektro-, CNG- und Methanolfahrzeuge				2,7%
Hybridfahrzeuge				2,2%
Dieselfahrzeuge		Filtersystem		1,5%

Im ‚green tax system‘ erhält der Fahrzeugbesitzer abhängig von der Klassifizierung seines Fahrzeugs als ‚Low Emission Vehicle (LEV)‘ unterschiedlich hohe Vergünstigungen auf die Automobilsteuer („automobile tax“). Hybrid-, Erdgas- und Elektrofahrzeuge werden zusätzlich einmalig mit einer Reduzierung der Anschaffungssteuer („acquisition tax“) begünstigt

¹⁰⁴ Hybrid-, Erdgas (CNG)- und Elektrofahrzeuge werden den ‚Ultra Low Emission Vehicles (ULEV)‘ zugeordnet [JAMA 2004a, S. 60].

[Nozaki 2005].¹⁰⁵ Die erste Stufe des Steueranreizsystems (Grenzwerte 2000) gilt für Fahrzeuge mit Erstzulassung zwischen dem 01.04.2001 und 31.03.2004. Im Jahr 2004 führt der japanische Gesetzgeber die zweite Stufe mit den niedrigeren Abgasgrenzwerten von 2005 ein (siehe Abschnitt 5.8.7) [JAMA 2004a, S. 60].

Mit der Verschärfung im Jahr 2004 zielt der japanische Gesetzgeber auf eine Entlastung des für das ‚green tax system‘ zur Verfügung gestellten Budgets von 20 Billionen Yen. Darüber hinaus begründen die zuständigen Ministerien die neuen gesetzlichen Mindestanforderungen mit der beschleunigten Verbreitung umweltfreundlicher Fahrzeuge, also mit dem Erfolg des Lenkungsinstruments [VTT 2003c, S. 1].¹⁰⁶ Mit der seit April 2006 geltenden Verschärfung des ‚green tax system‘ (siehe Tabelle 3-6) möchte der japanische Gesetzgeber vor allem die Kraftstoffeffizienz der Fahrzeuge verbessern.

Tabelle 3-6: Steuervergünstigungen im ‚green tax system‘ 2006 bis 2008 [JAMA 2004a, S. 60]

				Schadstoffemissionen 75% unterhalb der 2005 -Grenzwerte	
				Steuervergünstigung	
				Automobile Tax	Acquisition Tax
Kraftstoffverbrauch	Benzin	Kraftstoffeffizienzwerte 2010 um 10% übertreffen		1 Jahr 25% Steuernachlaß auf die Automobilsteuer	7.500 JPY
		Kraftstoffeffizienzwerte 2010 um 20% übertreffen		1 Jahr 50% Steuernachlaß auf die Automobilsteuer	15.000 JPY
	Diesel	Kraftstoffeffizienzwerte 2005 um 10% übertreffen		1 Jahr 25% Steuernachlaß auf die Automobilsteuer	7.500 JPY
		Kraftstoffeffizienzwerte 2005 um 20% übertreffen		1 Jahr 50% Steuernachlaß auf die Automobilsteuer	15.000 JPY

Ein Beispiel für eine Kaufsteuer als Malussystem ist die sogenannte ‚guzzler tax‘ in den USA als verbrauchsorientierte (einmalige) Steuer bei der Fahrzeugzulassung. Diese Zulassungssteuer belastet den Kauf von PKW mit hohem Verbrauch (z.B. Geländewagen). Hierbei ist die Steuerbelastung abhängig von der Reichweite in Meile pro Gallone Kraftstoff.¹⁰⁷ Mit einem Bonus-/Malussystem, welches die Bonuszahlungen für emissionsärmere Fahrzeuge durch Maluszahlungen für Fahrzeuge mit höheren Emissionen finanziert, beschreitet Frank-

¹⁰⁵ Die unter Abschnitt 2.2.4.2 angeführten Kei-Cars unter 660 ccm haben zwar einen Steuervorteil gegenüber den genannten Standard- und Kleinfahrzeugen. Gleichwohl greift diese (spezielle) Inzentivierung nicht, so daß die Minifahrzeuge nicht weiter betrachtet werden.

¹⁰⁶ Siehe Datei [VTT Japan \(2003\) – Green Tax System in Japan](#)

¹⁰⁷ Der Tarif verläuft stufenförmig von 1000\$ für PKW, die im Bereich von 22,5mpg liegen, bis zu einer Maximalbelastung von 7800\$ für PKW, die weniger als 12,5 Meilen Reichweite haben. Für Europa sind die Verbrauchziele wenig ehrgeizig [AUDI 2005].

reich seit Juni 2004 schrittweise einen vergleichbaren Weg [Schäfer 2005b; Braunberger 2004].¹⁰⁸ Japan subventioniert Hybrid- und Elektrofahrzeuge mit bis zu 250.000 Yen (2.500 EUR) [VTT 2001b].

Kfz-Steuer und Ökosteuer verteilen sich über die Nutzungsphase des Lebenszyklus eines Fahrzeugs, sodaß die finanziellen Auswirkungen im Vergleich zu einer Kaufsteuer schwieriger einzuschätzen sind. Marktbeobachtungen zeigen, daß der Kunde die Zulassungssteuer stärker wahrnimmt als langfristige Unterhaltskosten [AUDI 2005]. Der Sachverständigenrat für Umweltfragen schlägt aus diesem Grund vor, die CO₂-basierte Kfz-Steuer teilweise im voraus einzufordern [SRU 2005, S. 174ff.].

3.3.4.5 Verschrottungsprämien im Verkehrssektor

Neben den Verbrauchssteuern und Steueranreizsystemen gibt es noch Verschrottungsprämien als ‚Umweltsubvention‘, mit denen eine Senkung der Emissionen erreicht werden kann. Durch die Zahlung einer Verschrottungsprämie können Besitzer älterer Fahrzeuge motiviert werden, ihr Fahrzeug früher stillzulegen und durch ein moderneres und emissionsärmeres Fahrzeug zu ersetzen. Dieses ökonomische Anreizinstrument ist besonders deshalb interessant, weil ältere Fahrzeuge überproportional für Schadstoffemissionen verantwortlich sind [BenDor 2004, S.6f.]. Andere ökonomische Steueranreizsysteme berücksichtigen diesen Umstand nicht in angemessenem Rahmen, da sie hauptsächlich bei Neufahrzeugen ansetzen. Daher bleiben diese älteren Fahrzeuge unter Umständen für eine sehr lange Zeit in Betrieb. Durch die Zahlung einer Verschrottungsprämie hingegen kann die Verschiebung der Zusammensetzung des Fahrzeugbestandes hin zu emissionsärmeren Fahrzeugen beschleunigt werden.

Die Finanzierung könnte durch Einnahmen aus Erhebungen von Steuern auf Kaufpreise von Fahrzeugen mit hohen Emissionen realisiert werden. Auch hier muß ähnlich wie bei dem Instrument der Bonus- und Maluszahlungen auf Kaufpreise eine Einkommensneutralität sichergestellt werden. Entsprechende Untersuchungen zeigten, daß bei einer Zahlung von 3000 US-Dollar 0,9 Millionen amerikanische Fahrzeugbesitzer bereit wären, ihre Pkw verschrotten zu lassen. Das entspräche einer Reduktion von etwa 90 Prozent der über 15 Jahre alten Pkw und von 35 Prozent der Gesamtemissionen. Unter Nutzung eines einzelnen Budgets können die langfristigen Emissionsreduktionen anderer Steueranreizsysteme mit den kurzfristigen Reduktionen der Verschrottungszahlungen verbunden werden [SRU 2005, S.150; BenDor 2004, S.8].

In Japan werden bis zu 1807 EUR für die Verschrottung bei Neukauf eines Hybridfahrzeuges gezahlt [JAIA 2006, S. 5]. Der Vorsitzende von Peugeot-Citroën Folz propagiert im Juni 2005

¹⁰⁸ Frankreich fördert Fahrzeuge mit 120gCO₂/km mit 500 EUR und belegt Fahrzeuge über 300gCO₂/km mit einer Strafsteuer von 3000 EUR [Schäfer 2005b].

eine Prämie von 1000 EUR für ältere Fahrzeuge. Italien und Spanien haben bereits 1998 ein Prämiensystem eingeführt. Der Verband der Internationalen Kraftfahrzeughersteller (VDIK) in Deutschland empfiehlt seinen Mitgliedern ab dem 1.04.2006 geeignete Fördermaßnahmen zur Rücknahme und Entsorgung von Fahrzeugen der Abgasstufe EU-1 und schlechter. Der US-Bundesstaat Kalifornien zahlt Prämien von bis zu 1000 US-Dollar für die Verschrottung alter Fahrzeuge [AMS 2005a; Niemann 2004; VDA 2003, S. 35f.; VDIK 2005].

Kontrovers diskutiert wird die tatsächliche Wirkung der Prämien, da die Zahlung nicht an die Neuanschaffung verbrauchsgünstiger Fahrzeuge gebunden ist. Darüber hinaus geht die durch Verschrottungsprämien erreichte Nachfragesteigerung zu Lasten nachfolgender Perioden, so daß umweltfreundliche Techniken möglicherweise länger für die Markteinführung benötigen [DLR 2002, S. 56f.].

Eine weitere vieldiskutierte Maßnahme der Umweltsubvention im Verkehrssektor ist die in vielen Ländern diskutierte Förderung der Rußpartikelfilter-Nachrüstung zur Minderung der Staubemissionen [UBA 2005a; UBA 2005b; DY 2003b; DY 2003c].

3.3.5 Umweltzertifikate

3.3.5.1 Umweltzertifikate in der ökonomischen Theorie

Das mengensteuernde Instrument der Umweltzertifikate gründet sich auf der kostenlosen Ausgabe oder dem Verkauf handelbarer Verschmutzungsrechte durch den Staat. Ziel ist es, die Zertifikate knapp zu halten und an ein Minderungsziel anzupassen. Der Besitz berechtigt für einen festgelegten Zeitraum dazu, eine bestimmte Schadstoffmenge an die Umwelt abzugeben. Wer weniger emittiert, kann seine überschüssigen Rechte an Unternehmen verkaufen, für die es günstiger ist, den Preis für Verschmutzungsrechte zu zahlen als bestehende Anlagen umzurüsten. Unternehmen mit Grenzvermeidungskosten unterhalb der Marktpreise für Zertifikate werden so über ihre eigenen Verpflichtungen hinaus Maßnahmen zur Emissionsreduktion ergreifen und die freigesetzten Emissionsrechte mit Gewinn verkaufen. Unternehmen mit höheren Grenzvermeidungskosten entscheiden dagegen, Emissionsrechte am Markt zuzukaufen, anstatt in Technologie zur Vermeidung zu investieren.¹⁰⁹ Der Preis signalisiert die durch das Reduktionsziel in der Menge vorgegebene Knappheit des Umweltgutes „Atmosphäre“ und sorgt für die notwendige Lenkungswirkung. In einem solchen System erfolgt die Emissionsreduktion dort, wo die Vermeidungskosten minimal – also gesamtwirtschaftlich am geringsten – sind [Fritsch et al. 1996, S. 85ff.; Michaelis 2004, S. 183].¹¹⁰

¹⁰⁹ Im Rahmen der Vereinbarungen von Kyoto sind flexible Maßnahmen zum Erreichen des CO₂-Ziels – darunter Investitionsprojekte im Ausland und der grenzüberschreitende Emissionshandel möglich.

¹¹⁰ Sektorale Zielvorgaben sorgen dagegen für die Reduktion in einem bestimmten Wirtschaftszweig – ohne Ausweichmöglichkeiten [VDA 2005].

Der Kauf von Zertifikaten ist genau wie bei der Umweltabgabe *effizient*. Die Funktion des Steuersatzes nimmt hierbei der Zertifikatskurs an. Der Emissionshandel vermeidet die ökologischen Unsicherheiten der Abgabenlösung, indem er die Menge der ausgegebenen Zertifikate auf den Emissionszielwert begrenzt (*ökologisch treffsicher*). Bei Umweltzertifikaten gibt es genau wie bei der Steuer finanzielle *Anreize* zur Entwicklung neuer Techniken. Je weiter sich die Emissionen durch umwelttechnischen Fortschritt reduzieren, desto mehr Ausgaben für Zertifikate spart das Unternehmen [Endres 2000, S. 142ff.; Junkernheinrich 1998, S. 213]. In Bezug auf die politische Durchsetzbarkeit erfordert der Zertifikatehandel noch viel Aufklärung, da die Gesellschaft bei diesem Instrument einen „Ausverkauf der Umwelt“ vermutet. Darüber hinaus erfordert das Instrument ein Umdenken in der vom Ordnungsrecht geprägten Umweltpolitik [Gawel 1998, S. 113; Cansier 1998, S. 97].

3.3.5.2 Umweltzertifikate im Verkehrssektor

Im Oktober 2003 ist die EU-Richtlinie zum Handel mit Emissionsrechten in Kraft getreten (Beginn Januar 2005). Der Handel beschränkt sich wegen der geringeren Transaktionskosten auf Großemittenten aus den Sektoren Energiewirtschaft und Industrie und erfaßt damit nur 46 Prozent der CO₂-Emissionen. Transaktionskosten umfassen dabei die Kosten, die mit jeder Austauschbeziehung, insbesondere mit dem Abschluß von Verträgen, verbunden sind. Der Individualverkehr mit 30 Millionen Fahrzeughaltern allein in Deutschland hat hohe Transaktionskosten und ist mit Ausnahme der zur Automobilproduktion benötigten Kesselhäuser zur Erzeugung von Prozeß- und Raumwärme nicht vom Emissionshandel betroffen. Gleichwohl erwägt die EU wiederholt die direkte oder indirekte Einbindung des Individualverkehrs in den Emissionshandel – eventuell bereits ab 2008, dem Zieljahr der freiwilligen Selbstverpflichtung.¹¹¹ Das Motiv hierfür sind die Effizienzverluste, denn kostengünstige Vermeidungsmaßnahmen in anderen als den erfaßten Sektoren bleiben unberücksichtigt [VDA 2005; Michaelis 2004, S. 183; ACEA 2003b]. Auch das politisch-administrative System in Japan zieht langfristig einen Zertifikatehandel (im Nutzfahrzeugsektor) in Betracht [MLIT 2003; Wada 2004; Schindler 2002]. Dabei lassen sich drei verschiedene Ansatzpunkte unterscheiden:

- Fahrzeughalter,
- Kraftstoffhandel und
- Fahrzeughersteller.

Bei einem Emissionshandelssystem von Fahrzeughaltern („downstream-Ansatz“), also dem unteren Bereich der volkswirtschaftlichen Wertschöpfungskette, bekommt jeder Fahrzeugbe-

¹¹¹ Anm.: Die britische EU-Ratspräsidentschaft hat sich für einen Emissionshandel im Luftverkehr (nach 2012) ausgesprochen, womit sich gleichzeitig konzeptionelle Weichen für den Straßenverkehr stellen [Schäfer 2005b].

sitzer ein bestimmtes Kontingent an Kraftstoff- bzw. CO₂-Emissionsrechten oder zurückzulegenden Kilometern zugeteilt, wobei überschüssige Mengen frei handelbar sind. In der Praxis kann sich dabei die Fahrzeugnutzung über die jährliche Kfz-Steuer (CO₂/Zeiteinheit) verteuern. Das Motiv bei diesem Ansatz liegt darin, daß die Emissionen direkt bei dem Verursacher erfaßt werden. Wegen der hohen Anzahl an Verursachern führt ein solcher Ansatz jedoch zu erheblichen Transaktionskosten und die Festlegung eines geeigneten Zuteilungsschlüssels ist mit Problemen verbunden. Zudem ist bei diesem System von „Bezugsscheinen“ mit erheblichen Akzeptanzproblemen zu rechnen. Bei Betreibern von Fahrzeugflotten und im Nutzfahrzeugsektor ist der Zertifikatehandel leichter umsetzbar [SRU 2005, S. 174ff.; VDA 2005; UBA 2003h; Michaelis 2004, S. 187].

Das Emissionshandelssystem auf der Stufe des Kraftstoffhandels (Kraftstoff- oder „upstream-Ansatz“) kontingentiert die Menge des Kraftstoffs. Dieses am oberen Bereich der volkswirtschaftlichen Wertschöpfungskette ansetzende Handelssystem hat Vorteile in Bezug auf die Transaktionskosten und die punktgenaue Realisierung des angesetzten Emissionsziels¹¹², wirkt sich aber infolge der Überwälzungsprozesse auf Verbraucher wie eine zusätzliche Kraftstoffpreiserhöhung in CO₂ pro Liter aus. Mit dieser Doppelbesteuerung läßt sich keine Lenkungswirkung erzielen, die über das Preissignal einer Ökosteuer hinausgeht [SRU 2005, S. 174ff.; VDA 2005]. Insbesondere die Hersteller haben bei diesem Ansatz keine ausgeprägten Anreize zur Verbesserung der Energieeffizienz ihrer Produkte, was sich zum einen durch die geringe Kraftstoffpreiselastizität und zum anderen durch vielschichtige Käuferpräferenzen erklärt [Michaelis 2004, S. 187].¹¹³

Im Rahmen des Emissionshandelssystems bei Fahrzeugherstellern (Hersteller- oder „mid-Stream-Ansatz“), also dem mittleren Bereich der volkswirtschaftlichen Wertschöpfungskette, erfolgt eine Lizenzierung der CO₂-Flottenemissionen der von den einzelnen Herstellern während einer Abrechnungsperiode auf den Markt gebrachten Fahrzeuge. Hierbei lassen sich die über alle Hersteller aggregierten Flottenemissionen um einen bestimmten Prozentsatz (z.B. ACEA-Verpflichtung von 120gCO₂/km) vermindern. Die Handelbarkeit der Emissionsrechte sorgt dafür, daß die Emissions- und Verbrauchsreduzierungen bei denjenigen Herstellern stattfinden, bei denen dies zu den geringsten Kosten möglich ist (Lastenverteilung) und setzt damit – theoretisch – einen Anreiz zur Entwicklung umweltfreundlicher Fahrzeuge und zur Verkleinerung von Motoren („Downsizing“).¹¹⁴ Da die Kosten für die Emissionslizenzen –

¹¹² Die Zertifikate beziehen sich auf den Kohlenstoffgehalt der Brennstoffe [UBA 2005h]

¹¹³ Wichtige Faktoren wie Sicherheit und Komfort sprechen für ein hohes Gewicht und starke Motorisierung und damit für einen hohen Kraftstoffverbrauch. Studien belegen, daß sich Kunden trotz steigender Kraftstoffpreise eine stärkere Motorisierung wünschen [DAT 2002].

¹¹⁴ Beispiel Europa: Je nach Flottenstruktur entwickeln sich die deutschen Hersteller (z.B. Audi, Mercedes-Benz, BMW) zu Käufern und französische, italienische und japanische Hersteller (z.B. PSA, Renault, Fiat, Honda Nissan, Toyota) zu Verkäufern [VDA 2005].

zumindest teilweise – an die Fahrzeughalter weitergegeben werden, haben auch diese einen Anreiz, umweltfreundliche Fahrzeuge zu kaufen. Im Gegensatz zum Kraftstoff-Ansatz bildet der Hersteller-Ansatz so keine zusätzliche Besteuerung, sondern eine Ergänzung zur Ökosteuer in Form einer Kaufsteuer bzw. Kaufsubvention (CO₂ über die Lebensdauer) ab. Gestaltungsfragen beziehen sich auf die vom Emissionshandel erfaßten Fahrzeugtypen, die Bestimmung der Bemessungsgrundlage, die Festlegung der Flottenemissionsstandards für die einzelnen Hersteller (Erstallokation) und ihre Verschärfung im Zeitverlauf [SRU 2005, S. 174ff.; Michaelis 2004, S. 188ff., Münch 1995, S. 228f.].¹¹⁵ Das Erreichen des Minderungsziels ist jedoch nur durch strikte Schadstoffmengenvorgaben sichergestellt, da die Hersteller auf Gesamtfahrleistung und Fahrverhalten keinen Einfluß haben [UBA 2003h; Michaelis 2004, S. 188]. Bei Einführung eines Emissionshandels fordert ACEA die Eingliederung anderer Wirtschaftszweige, die kostenlose Zuteilung der Rechte, insgesamt keine Erhöhung der Mobilitätskosten, Entlastungen für CO₂-neutrale Kraftstoffe und flexible Maßnahmen – darunter Investitionsprojekte im Ausland und grenzüberschreitender Emissionshandel [Schäfer 2005b]. Bei absoluten CO₂-Emissionen als Bemessungsgrundlage muß ein Hersteller erhöhte Verkaufszahlen durch eine zusätzliche Senkung der spezifischen Emissionen oder durch den Zukauf von Emissionsrechten ausgleichen. Hieraus könnte eine – indirekte – Absatzbeschränkung hervorgehen, die in Anbetracht der wirtschaftlichen Bedeutung des Automobilsektors auch für den politischen Entscheidungsträger mit Problemen behaftet ist. Eine Verknüpfung mit dem bislang sektoralisierten EU-System für Großemittenten wirkt dem nach Aussage von Sachverständigen entgegen [Michaelis 2004, S. 190; Hohenstein et al. 2002, S. 107; Mez et al. 1997, S. 9].

Als Gegenvorschlag bliebe noch die Vorgabe verbindlicher Flottenverbrauchsstandards, wie sie das politisch-administrative System in Japan und Kalifornien eingeführt hat bzw. noch beabsichtigt (siehe Abschnitt 2.4). So werden im ‚Top-Runner-Approach‘ in Japan Flottenverbrauchsstandards unterschiedlicher Gewichtsklassen vorgegeben, die sich am jeweils energieeffizientesten Fahrzeug der entsprechenden Gewichtsklasse orientieren und bis 2010 erreicht werden müssen.¹¹⁶ Auch mit diesem Ansatz kann die Politik die Entwicklung neuer Techniken vorantreiben. Gleichwohl ist der Top-Runner-Ansatz weniger flexibel in der un-

¹¹⁵ In Bezug auf die zu erfassenden ‚Fahrzeugtypen‘ ist zu entscheiden, ob neben PKW auch LKW einzubeziehen sind. Als Bemessungsgrundlage sind die absoluten und spezifischen CO₂-Emissionen heranzuziehen, wobei letztere keine Begrenzung der absoluten Emissionsmenge erlaubt. Die Gesamtemissionsmenge kann selbst bei sinkenden spezifischen Emissionen und konstanter Gesamtfahrleistung steigen, wenn der Motorisierungsgrad zunimmt (z.B. Schwellenländer) [Michaelis 2004, S. 189f.].

¹¹⁶ Die ostasiatischen Länder China, Korea und Taiwan orientieren sich am japanischen Ansatz und teilen die Flotten in unterschiedliche Gewichts- oder Hubraumklassen ein [AMS 2005d; Ball 2004; Lee and Wonacott 2004].

ternehmerischen Bestimmung des Modell- und Technologieportfolios und führt gegenüber dem Emissionshandel zu betriebs- und volkswirtschaftlich höheren Kosten [SRU 2005, S. 174ff.; METI o. J.]. Beim durchschnittlichen Flottenverbrauch nach CAFE-Standards (siehe Abschnitt 2.4) ist der betriebliche Entscheidungsträger in seinem Modell- und Technologieangebot weniger vom Staat reguliert. Hierbei sind Volumenhersteller im Vorteil, weil diese hubraumstarke Fahrzeuge innerhalb ihrer breiten Modellpalette ausgleichen können. Gleichwohl ist bei Nicht-Einhaltung des Flottenstandards die gesamte Produktion des Herstellers betroffen [Schäfer 2005b; Neu 1990, S. 143, zitiert nach Münch 1995, S. 225].

3.3.6 Informatorische, organisatorische und freiwillige Instrumente

Neben ordnungspolitischen und ökonomischen Instrumenten nutzen Politik und Wirtschaft informatorische, organisatorische und freiwillige Instrumente. Hiermit wird insbesondere das Ziel verfolgt, die Entwicklung neuer Techniken deutlicher zu kommunizieren. Das folgende Kapitel erläutert beispielhaft freiwillige Selbstverpflichtungen, Verbraucherinformationen, das ökologische Marketing und suasorische Instrumente.

3.3.6.1 Umweltbetriebsprüfungen

Umweltbetriebsprüfungen oder Umweltaudits als Teil des ‚Umweltcontrolling und Umweltmanagements‘ erfüllen die Aufgabe der frühzeitigen Information über interne und externe (umweltbezogene) Chancen und Risiken. Das Umweltaudit soll insbesondere

- eine systematische Bestandsaufnahme durchführen,
- die Einhaltung der gesetzlichen und unternehmensbezogenen Normen gewährleisten,
- die ergriffenen Maßnahmen, die umweltbezogene Organisation, die Managementsysteme und die dazu eingesetzten Ressourcen evaluieren und
- das Verbesserungspotential, neue Lösungsmöglichkeiten und Ziele identifizieren.

Gerade in Deutschland und Japan, wo es ein umfangreiches umweltpolitisches Regelungsnetzwerk gibt, ist die sichere Einhaltung dieser Bestimmungen eine notwendige, wenn auch nicht hinreichende Voraussetzung für ein effektives Umweltmanagement. Damit hat ein Audit eine wichtige interne Controlling-Funktion. Das Ziel der Evaluierung von Maßnahmen, Systemen und der Organisation ist unter Aspekten der strategischen Planung am interessantesten, denn hier entscheidet sich, ob Umweltschutz für das Unternehmen als Belastung oder Wettbewerbsvorteil zu werten ist [Steger 1996, S. 247; Altmann 1997, S. 175]. Die regelmäßige Abgasuntersuchung ist gesetzlich für alle Fahrzeuge vorgeschrieben und gibt Auskunft darüber, ob ein Fahrzeug unter den festgelegten Emissionshöchstwerten liegt [Dekra 2006; ACEA 2005d].

3.3.6.2 Freiwillige Selbstverpflichtungen

Freiwillige Selbstverpflichtungen und Vereinbarungen zwischen Industrie und Politik haben in den letzten Jahren stetig an politischer Bedeutung gewonnen. Das Spektrum der Selbstver-

pflichtungen reicht von branchenspezifischen Selbstverpflichtungen bis zu branchenübergreifenden Vereinbarungen. Wirtschaftszweige oder einzelne Unternehmen verpflichten sich zum Beispiel zur Reduzierung festgelegter Grenzwerte von Luftschadstoffen oder CO₂.

Wie in Abschnitt 2.4 bereits erläutert, verpflichtet sich die europäische Automobilindustrie auf eine Senkung auf 140 gCO₂/km bis zum Jahr 2008. Im Gegenzug behält sich die Politik vor, einen verbindlichen Rechtsrahmen zu verabschieden, falls der jeweilige Wirtschaftszweig das Emissionsziel nicht einhält oder keine hinreichenden Fortschritte bei der Annäherung erzielt werden [SRU 2005, S. 170f.; Kösters 1997, S. 198]. Das Reduktionsziel der ACEA-Selbstverpflichtung liegt zwar im Korridor der allgemeinen Verbrauchsentwicklung. Unter Berücksichtigung der im Zeitraum von 1995 bis 2001 umgesetzten Maßnahmen sanken die spezifischen CO₂-Emissionen von 186 auf etwa 167 bis 170 gCO₂/km. Dadurch ist aber nicht gewährleistet, daß damit das Ziel erreicht wird. Der in den letzten Jahren zunehmende Nachfragetrend nach höherer Motorleistung und nach Ausstattungen, die Fahrzeuggewicht und Kraftstoffverbrauch erhöhen, wirkt einer sicheren Zielerreichung entgegen. Somit ist der PKW-Käufer letztlich derjenige, der die Norm erfüllt, der Verband jedoch der Adressat. Insofern ist auch eine weitergehende Verbrauchsreduktion mit dem Ziel von 120 gCO₂/km bis zum Jahr 2012 nur durch alternative Instrumente zu erreichen, welche die Verschiedenartigkeit von Normadressat und Normerfüllenden beseitigen. Schließlich sieht die ACEA-Selbstverpflichtung keine Belohnung (Bestrafung) für Hersteller vor, die das Minderungsziel unterschreiten (nicht einhalten) [Arthur D. Little 2003; SRU 2005, S. 173; UBA 2003h].

In Japan hat der Industrieverband ‚Nippon Keidanren‘ 1997 eine freiwillige Selbstverpflichtung zur CO₂-Reduzierung begründet – die Automobilindustrie ist davon ausgenommen [Wada 2004].

Das Instrument der freiwilligen Selbstverpflichtung weist Schwächen in Bezug auf die ökologische Effektivität und ökonomische Effizienz auf. So bleibt zum einen die Zielvereinbarung nach Aussage von Sachverständigen unter den technischen Möglichkeiten zurück, zum anderen gibt es zwischen den ACEA-Mitgliedern keine Lastenverteilung, so daß es jedem einzelnen Hersteller selbst überlassen bleibt, in welchem Umfang er zur Zielerreichung beiträgt. Folglich führt die Selbstverpflichtung auch nicht zu einem Ausgleich der Grenzvermeidungskosten zwischen Herstellern. Die unter Abschnitt 2.4 erwähnten „Öffnungsklauseln“ mit der Verknüpfung der Selbstverpflichtung an die wirtschaftliche Entwicklung geben den Herstellern schließlich einen umfangreichen Spielraum, von den vereinbarten Zielen abzuweichen [Michaelis 2004, S. 186].

3.3.6.3 Verbraucherinformation

Nach einer Umfrage des Bundesumweltministeriums fühlen sich 62 Prozent der Befragten „eher schlecht“ bis „sehr schlecht“ über die Gesundheits- und Umweltverträglichkeit von

Produkten informiert. Etwa die Hälfte der Befragten beklagt zudem einen zu geringen Umfang bei der Umweltberichterstattung und wünscht sich von einer 'neutralen' Instanz Hilfestellung bei der eigenen Kaufentscheidung [BMU 2004, S. 30, Automobilwoche 2007, S. 32]. Die Politik hat hier die Möglichkeit, den Umweltstandard von Produkten mit Hilfe von Kennzeichnungen gegenständlich zu machen. Dabei kann es sich zum einen um positive Kennzeichnungen handeln, bei der die Umweltverträglichkeit eines Gutes herausgestellt wird (z.B. Blauer Engel, Bio-Siegel). Zum anderen kann es eine negative Kennzeichnung sein, durch welche sich schädliche Substanzen eines Produktes konkretisieren (z.B. Dieselrußplaketten). Die meisten Kennzeichnungen erfolgen auf freiwilliger Grundlage. Umweltkennzeichen sollen den Verbraucher bei der Auswahl und Beurteilung von umweltfreundlichen Produkten unterstützen und ihm genaue Informationen geben. Umgekehrt sind Unternehmen damit in der Lage, ihre (umwelt)technische Kompetenz ‚proaktiv‘ zu kommunizieren und sich schrittweise als Umweltschutz- und Technologieführer aufzustellen [Altmann 1997, S. 202; Meffert und Kirchgeorg 1998, S. 273, 303]. Gleichzeitig nutzen Hersteller zunehmend eigene Umweltlabel, um die Umweltverträglichkeit ihrer Produkte zu unterstreichen (z.B. Opel Ecoflex, Volkswagen Blue Motion).

In den Industrieländern gibt es eine Vielzahl von Umweltzeichen mit voneinander abweichenden Kriterien. Problematisch dabei ist die Glaubwürdigkeit und Kundenakzeptanz. Die Plaketten beeinflussen das Verhalten des Verbrauchers nur dann, wenn dieser die (positive) Botschaft hinter den Kennzeichen eindeutig versteht [Altmann 1997, S. 202ff.; Zanger und Gaus 2003a, S. 1; Zanger und Gaus 2003b, S. 5]. Weitere Verbraucherinformationen sind beispielsweise die im Klimaschutzprogramm der Bundesregierung festgelegten Informations- und Aufklärungskampagnen zum energiesparenden Fahren [BMVBS 2005].

Die Wirksamkeit von Umweltkennzeichen hängt davon ab, inwieweit die Information der Plakette ein verdichtetes Gesamturteil abgibt, wie hoch die Bekanntheit des Zeichens ist, ob es für sich allein steht oder mit anderen Zeichen konkurriert und wie hoch der Verbreitungsgrad ist. Hierbei sind auch die Farben, Schriften und Logos entscheidend für Wahrnehmung, Wiedererkennung und Einordnung des Kennzeichens [Zanger und Gaus 2003b, S. 5; Herbst 2005].

Im Bereich des Individualverkehrs wurde in den 1980er Jahren als Kennzeichnung die G-Kat-Plakette eingeführt und § 40, Absatz 2 BimSchG ermöglichte bestimmte Verkehrsbeschränkungen für Fahrzeuge ohne G-Kat. Ursache für die geringe Lenkungswirkung der Plakette war insbesondere die unauffällige Gestaltung des Zeichens, wenig tatsächlich ausgesprochene Fahrverbote und eine unzureichende Informationspolitik [SRU 2005, S. 15]. Um eine einfache Zuordnung der jeweiligen Verbrauchswerte zu ermöglichen, sieht die EU-Richtlinie

1999/94/EG Verbraucherinformationen über den Kraftstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen vor (siehe Abbildung 3-4).¹¹⁷

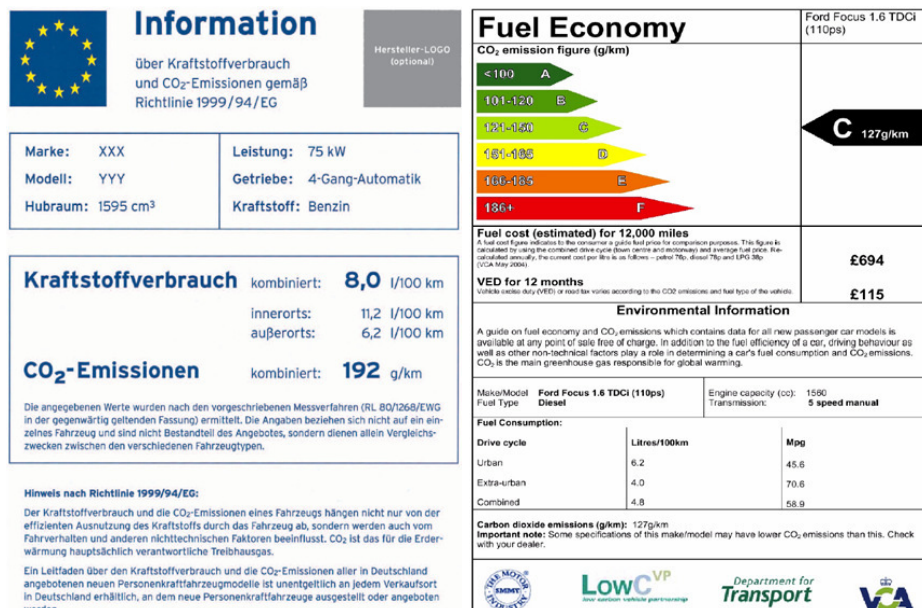


Abbildung 3-4: Bestehende Energieeffizienzkennzeichen für PKW

Um die Kunden richtig zu informieren, legt die Richtlinie Mindeststandards für Umweltkennzeichen fest. So sind bestimmte Textauszüge der EU verpflichtend und das Umweltkennzeichen muß Angaben zum Modell, dem Kraftstofftyp, dem Kraftstoffverbrauch (in l/100km oder km/l bis zur ersten Dezimalstelle) und den spezifischen CO₂-Emissionen (in g/km auf eine ganze Zahl auf- oder abgerundet) beinhalten. In der EU gibt es einerseits Energieeffizienzkennzeichnungen, welche diesem Mindeststandard entsprechen, andererseits solche, die dem Verbraucher noch darüber hinausgehende Informationen bieten (z.B. Kaufpreisangaben, Informationen zu automobilbezogenen Steuern, Lärmemissionen, Vorhandensein eines Partikelfilters) [Gärtner 2005, S. 76]. Vergleichbare Informationspflichten gibt es nach Richtlinie 92/75/WG bereits für Elektro(nik)-geräte wie Kühlschränke oder Waschmaschinen.

Seit dem Inkrafttreten der EU-Richtlinie 1999/94/EG wurden verschiedene Vorschläge für eine effektive Ausgestaltung des Energieeffizienzlabels im PKW-Bereich erarbeitet. Insgesamt sollen die Informationen für den Verbraucher leicht verständlich aufbereitet und optisch einfach zu erfassen sein, um damit die Kaufentscheidung für umweltfreundliche Fahrzeuge zu unterstützen (siehe Abbildung 3-5).

¹¹⁷ Umsetzung der EU-Richtlinie in nationales Recht bis 18.01.2005 [UBA 2005h; EU-Kommission 2006]. In Deutschland ist die „Verordnung zur Kennzeichnung des Energieverbrauchs von PKW (Pkw-EnVKV)“ seit 1.11.2004 in Kraft [Sperling 2004; DAT 2004b; DAT 2004c].

Die Verbrauchs- bzw. CO₂-Kennzahl gründet sich auf der Grundfläche des Fahrzeugs (Liter/[100km*m²] oder gCO₂/[km*m²]). Diese Kennzahl wird ins Verhältnis zu einer durchschnittlichen Kennzahl gesetzt, einem linear gleitenden Mittelwert aus den im Vorjahr angebotenen Fahrzeugen. Die relativen Abweichungen zum Mittelwert sind in sieben Effizienzklassen unterteilt [UBA 2003h; Wokaun et al. 2005; AW Knowledge 2005c; DAT 2004c; VCD 2004, S. 29].

Informationen über Kraftstoffverbrauch und CO ₂ -Emissionen gemäß Richtlinie 1999/84/EG		2002
Marke	AN-RK	
Modell	MNK 1.4	
Hubraum	1.400 cm ³	
Leistung	45 kW	
Kraftstoff	Benzin bleifrei	
Getriebe	5-Gang	
Kraftstoffverbrauch		7,3 Liter/100 km
Messung gemäß 80/1268/EWG i.d.F. [aktuelle Version]		
innerstädtisch		8,0 l/100 km
außerstädtisch		6,8 l/100 km
Vergleich des Kraftstoffverbrauchs mit dem Durchschnitt aller angebotenen PKW gleicher Grundfläche im Bezugsjahr [-]		
CO ₂ -Emission		175 g/km
Kraftstoffkosten bezogen auf 100.000 km ermittelt gemäß 93/116/EG und einem Kraftstoffpreis von		7.520 € 1,03 €/Liter

Stunde nach Abklemmung (88/442/EG): Der Kraftstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen eines Pkw liegen nicht nur von der effizienten Auslegung des Motors, sondern auch von der Bauweise, den Reifen, dem Fahrerverhalten und anderen nichttechnischen Faktoren beeinflusst. CO₂ ist das für die Klimaerwärmung verantwortliche Treibhausgas. Die Angaben zum Kraftstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen eines Pkw sind Kennwerte, die sich nicht ändern. In Deutschland bedeutet, ein Pkw eine bestimmte Effizienzklasse zu erreichen, dass er im Vergleich zu anderen Pkw in dieser Klasse einen niedrigeren Kraftstoffverbrauch und/oder eine geringere CO₂-Emission aufweist.

Abbildung 3-5: Formblatt zur Berechnung der Energieeffizienz eines Autos [UBA 2003h]

Eine Kennzeichnungsverordnung des Bundesumweltministeriums in Zusammenarbeit mit der Deutschen Umwelthilfe treibt die Etikettierung von Fahrzeugen nach vier Schadstoffgruppen voran. PKW und LKW sollen ab 2008 je nach Schadstoffausstoß farblich differenzierte Plaketten mit einem Durchmesser von acht Zentimetern tragen (siehe Abbildung 3-6) [Fickinger 2005]. Die Verordnung verpflichtet zudem deutsche Städte mit hoher Feinstaubbelastung, Umweltzonen auszuweisen, in die nur umweltfreundliche Fahrzeuge einfahren dürfen.

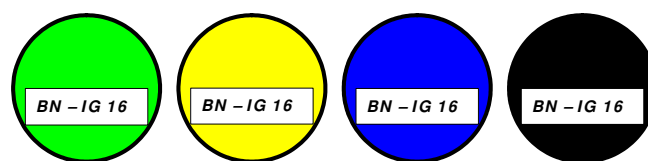


Abbildung 3-6: Plakettenmuster der Deutschen Umwelthilfe [DUH 2005b]

In Japan besteht bereits seit April 2001 das unter Abschnitt 2.4.5 und 3.3.4.4 bereits erläuterte ‚green tax system‘ welches Steuervorteile beim Kauf von schadstoffarmen und kraftstoffeffizienten Fahrzeugen gewährt und diese umweltfreundlichen Fahrzeuge deutlich sichtbar kennzeichnet (Abbildung 3-7).



Abbildung 3-7: Design der japanischen Umweltzeichen in 2004

Die japanischen Hersteller setzen die Umweltetiketten in Japan werbewirksam als Marketinginstrument ein und belegen somit ihre (umwelt-)technische Kompetenz im Automobilbau. Hierbei erwarten die Werbetreibenden eher eine indirekte und dauerhaft tragfähige Markenbildung als eine direkte Absatzwirkung. Da Bekanntheit und Image von hoher Bedeutung für die Kaufentscheidung in Japan sind, ergibt sich hier ein wichtiger Ansatzpunkt für den Gebrauch von werbewirksamen Umweltzeichen im Zuge des Markteintritts [Yamaki 1986, S. 245, 252ff.; Murata 1986, S. 44].

3.3.6.4 Ökologisches Marketing

Marketing ist die Gestaltung der Außenbeziehungen eines Unternehmens und die Ausrichtung der Unternehmensaktivitäten auf die Absatz-, Markt- und Kundenbedürfnisse. Ökologisches Marketing erweitert dies um den Umweltaspekt, indem die Umweltverträglichkeit der wirtschaftlichen Aktivitäten des Unternehmens und seiner Produkte integriert werden [Fritz 1998, S. 19, 30; Altmann 1997, S. 200].

Die Unternehmen berücksichtigen in zunehmendem Maße den Faktor Umwelt bei den marktorientierten Aktivitäten. Die Umweltverträglichkeit eines Produktes ist dabei ein wichtiges Verkaufsargument und darüber hinaus zum Teil notwendige Voraussetzung für den Absatz. In der Folge ist es erforderlich, Produktprogramme oder Produktionsprozesse zu verändern [Meffert und Kirchgeorg 1998, S. 273; Altmann 1997, S. 200].

Der Produktpolitik fällt dabei eine entscheidende Rolle zu. Die Produktstrategie setzt bereits in der Phase der Produktentwicklung an. Unternehmen stellen Einsparungen von Rohstoffen und Energie, Verzicht auf umweltbelastende Substanzen oder Komponenten und umweltfreundliche Techniken beim Produktionsprozeß heraus. Beim Produkt selbst unterstreichen die Unternehmen Eigenschaften wie Energieeffizienz, Schadstoffarmut, Wiederverwendungs- bzw. Wiederverwertungsfähigkeit. Viele Hersteller versuchen hierbei, Öko-Markennamen und Markenartikel zu platzieren, um sich damit im Wettbewerb als Technologieführer zu profilieren und entsprechend zu differenzieren (z.B. Toyota-Prius) [Altmann 1997, S. 201]. In der Kommunikationspolitik sensibilisiert das Unternehmen die Kunden für umweltfreundliche Produkte und Verfahren. Vielfach werden dabei Umweltkennzeichen verwendet (siehe Abschnitt 3.3.6.3 und umweltschutzbezogene Mitarbeiterschulungen vorangetrieben. In der Preispolitik versucht das Unternehmen, den Umweltnutzen bei teureren Produkten hervorzuheben. Die Distributionspolitik stellt auf die Umweltfreundlichkeit des Vertriebs- und Beschaffungsweges ab [Altmann 1997, S. 201f.].

Marketinganstrengungen zur Förderung des Absatzes kleinerer und damit emissionsärmerer Fahrzeuge versprechen in der langfristigen Perspektive eine starke Wirkung, denn die gegenwärtige Einstellung der Bevölkerung zum Individualverkehr wird maßgeblich durch Marketingaktivitäten mitgeprägt. Sofern es hier zu einem Strategiewechsel kommt, in dessen Rah-

men ökologische Aspekte deutlich stärker betont werden, könnte dies einen Beitrag dazu leisten, die gegenwärtig in Teilen noch vorherrschende Präferenz für hohe Motorleistungen zu überwinden [Hoffmann-Riem und Eifert 1996, S. 318; Lohmann 99, S. 26, S. 36ff].

3.3.6.5 Suasorische Instrumente

Suasorische Instrumente zielen darauf ab, die (objektiven) Informationen und subjektiven Wertvorstellungen der betriebswirtschaftlichen Entscheidungsträger zu beeinflussen. Nach Siebert beruht die sogenannte ‚moral suasion‘

- auf einer Informationsbereitstellung über die potentiellen gesellschaftlichen Schäden (einzel)wirtschaftlicher Aktivitäten und
- auf Appellen an Unternehmen, potentielle gesellschaftliche Schäden mehr in betriebswirtschaftliche Entscheidungsprozesse einzubeziehen beziehungsweise (nicht-monetäre) Sanktionen bei mangelhafter Berücksichtigung anzudrohen [Siebert 1976, zitiert nach Michaelis 1996, S. 32f.].

Die direkte Wirkung dieser Instrumente hängt davon ab, wie stark die intrinsische Motivation des Unternehmens zu umweltverträglichem Verhalten ausgeprägt ist und welche Kosten die Entwicklung neuer (Umwelt-)techniken verursacht. Bei hohen Kosten, ist das Instrument nur als flankierende Maßnahme geeignet. Gleichwohl sollte die indirekte Wirkung suasorischer Instrumente über Veränderungen des Verbraucherverhaltens und die damit verbundenen Rückwirkungen auf Produzenten nicht unterschätzt werden [Michaelis 1996, S. 32f.]. Im Klimaschutzprogramm der Bundesregierung ist beispielsweise eine breite Informations- und Aufklärungskampagne zum energiesparenden Fahren vorgesehen. Zudem weisen Herstellerverbände auf Kraftstoffeinsparungen bei umweltfreundlichem Fahrverhalten und das Abschalten des Motors bei Leerlauf (‚idling stop‘) hin [JAMA 2005a, S. 46; Tokyo Metropolitan Government 2002a, S. 1, 10].

3.3.7 Vergleich der Instrumente

Kapitel drei hat sich mit politischen Instrumenten zur Internalisierung negativer externer Effekte im Verkehr auseinandergesetzt. Diese wurden anhand der folgenden Kriterien untersucht: Effizienz, ökologische Treffsicherheit und dynamische Anreizwirkung. Tabelle 3-7 zeigt, inwieweit die voneinander abweichenden Instrumente den Anforderungen an Lenkungsmechanismen für den Sektor Individualverkehr entsprechen.

Tabelle 3-7: Umweltpolitische Eingriffsmöglichkeiten im Vergleich [Fritsch et al. 1996, S. 119f.]

	Effizienz	Ökologische Treffsicherheit	Dynamische Anreizwirkung	Beurteilung für den Verkehrssektor
Umweltauflagen	eher schlecht	eingeschränkt	schlecht	nur in Ausnahmefällen geeignet (Mindeststandard)
Umwelthaftung <ul style="list-style-type: none"> • Gefährdungshaftung • Verschuldenshaftung 	gut eher schlecht	eingeschränkt eingeschränkt	relativ gut eher schlecht	zu viele kleine Emittenten im Verkehrssektor
Umweltabgaben	gut	eingeschränkt	gut	zielführend bei geeigneter Steuerbemessungsgrundlage
Umweltsubventionen zur Schadensverminderung	gut	eingeschränkt	fragwürdig	bedingt geeignet
Beihilfe zur Technologieentwicklung	gut	eingeschränkt	gut	gut geeignet
Umweltzertifikate	sehr gut	gut	gut	Problem in der praktischen Umsetzung
Informatorische, organisatorische und freiwillige Instrumente	eingeschränkt	eingeschränkt	eingeschränkt	nur in Ausnahmefällen geeignet (Mindeststandard)

Umweltauflagen können komplexe umweltpolitische Probleme im Verkehr nicht lösen. Hierfür ist – aus makroökonomischer Sicht – eine Neugestaltung marktwirtschaftlicher Anreizsysteme erforderlich. Ge- und Verbote als Umweltauflagen sind hinsichtlich Effizienz und ökologischer Treffsicherheit sehr beschränkt. Fraglich ist insbesondere, welche Eingriffsintensität gewählt werden soll. Das vollständige Verbot ist nur in wenigen Fällen (pareto-)optimal. Dennoch ist der Einsatz dort sinnvoll, wo irreversible Schäden drohen und ein sofortiger Eingriff dringend erforderlich ist (z.B. Innenstadtsperren). Mit der Anwendung eines umfassenden Haftungsrechts lassen sich negative externe Effekte zwar eindämmen, aber bei vielen einzelnen Emittenten wie im Bereich des Individualverkehrs sind Belastungen zum Teil nicht direkt zurechenbar. Bei Abgaben, insbesondere Verbrauchssteuern, ist die ökologische Treffsicherheit zwar eingeschränkt („Wer viel zahlt, darf viel verschmutzen“), aber der Umweltschaden wird da vermieden, wo die Kosten am geringsten sind [Altmann 1997, S. 150]. Die Lenkungswirkung ist daher sehr ausgeprägt. Gleiches gilt für Anschubfinanzierungen zur Entwicklung neuer Verbrauchs- und Abgastechniken. Die Subvention zur Schadensvermeidung animiert in einem früheren Stadium dagegen sogar zu Umweltbelastungen und widerspricht zudem Gerechtigkeitsvorstellungen. Bei der effizienten und treffsicheren Zertifikatslösung mit ausgeprägter Anreizwirkung sind die Erstaussgabe der Rechte bei den Interessengruppen und die Begrenzung des Marktes nur unter Schwierigkeiten umzusetzen. Der Ansatz auf Ebene der Fahrzeughersteller mit absoluten CO₂-Emissionen als Bemessungsgrundlage birgt zudem Wettbewerbsnachteile in einem für die Wirtschaft insgesamt wichtigen Industriezweig [Endres 2000, S. 142; Fritsch et al. 1996, S. 120ff.]. Informatorische, organisatorische und freiwillige Instrumente sind wegen der meist fehlenden Sanktionsmöglichkeiten als eingeschränkt hinsichtlich ihrer Lenkungswirkung zu beurteilen.

Infolge der aufgezeigten Vor- und Nachteile ist das von der Umweltpolitik festgelegte Umweltziel im Bereich ‚Verkehr‘ mit einem einzelnen politischen Instrument nicht zu erreichen.

Im Gegenteil, es kommt auf eine vernünftige Auswahl der Instrumente und die geeignete Eingriffsintensität an.

3.4 Notwendigkeit eines Systems zur Entscheidungsunterstützung

Die Ergebnisse der aufgeführten umwelt- und verkehrspolitischen Lenkungs Eingriffe stehen oft in keinem Zusammenhang mit der Planung. Planung ist hierbei die „gedankliche Vorwegnahme zukünftigen Handelns unter Beachtung des Rationalitätsprinzips“ [Grochla 1964, S. 315]. Die methodische Planung bezieht so das „Ungewöhnliche, Unerwartete, Sprunghafte möglicher technischer oder wirtschaftlicher Entwicklungen“ ein, so daß Politik und Wirtschaft Entscheidungen nicht unvorbereitet treffen [Gutenberg 1961, S. 121]. Das Ergebnis von Lenkungsmaßnahmen im Individualverkehr entspricht in vielen Fällen genau dem Gegenteil dessen, was der politische Entscheidungsträger in seiner Planung zu erreichen beabsichtigt. Und auch der unternehmerische Entscheidungsträger zieht aus politischen Lenkungs Eingriffen zumeist falsche Schlußfolgerungen.

Kritiker auf Seiten von Politik und Wirtschaft indes behaupten, die Komplexität im Bereich des Individualverkehrs sei ohnehin zu groß, um sie noch sinnvoll mit Hilfe von politischen Inzentivierungen zu lenken; die fortschreitende Offenheit von Volkswirtschaften ermögliche Ausweichstrategien für Marktteilnehmer, die sich zunehmend dem Einflußbereich von Nationalstaaten entzögen (z.B. Tanktourismus) [Wentzel 2005]. Wenn sich also zwischen (sozio-ökonomischen) Größen im Individualverkehr mit einem dynamischen Geflecht von individuellen Entscheidungen Zusammenhänge ergeben, so stellen diese immer nur ein Bild der Vergangenheit dar. Sofern sich die äußeren Rahmenbedingungen nicht ändern, ist es zwar plausibel, daß diese Zusammenhänge auch in Zukunft gelten, gesichert ist dies aber nicht. Fraglich ist, inwieweit sich feste Gesetzmäßigkeiten postulieren lassen, ob die Politik in einer Zeit internationaler wirtschaftlicher Zusammenhänge überhaupt noch zur systematischen Regelung von Ordnungsbedingungen im Individualverkehr fähig ist und ob Automobilhersteller Veränderungen frühzeitig einschätzen und ihr Produktportfolio daran ausrichten können.

Die Ungewißheit sozio-ökonomischer Entwicklungen, eine Vielzahl sich fortwährend verändernder Größen im Bereich des Individualverkehrs und die Wirkungen voneinander abweichender umwelt- und verkehrspolitischer Instrumentenkombinationen komplizieren die Planung tatsächlich erheblich; eine vereinfachende Sichtweise von komplexen Zusammenhängen ist daher für die Sammlung von Erfahrung unverzichtbar. Solange die Verkehrs- und Umweltpolitik zum einen diese komplexen Systeme nicht besser durchschaut, ist nicht zu erwarten, daß die Ergebnisse von Korrekturmaßnahmen und Regierungsprogrammen zu befriedigenden Ergebnissen führen. Der zukünftige Geschäftserfolg von Automobilherstellern zum anderen wird wesentlich durch die Fähigkeiten bestimmt, aufkommende Veränderungen im Individualverkehr rechtzeitig zu antizipieren, in ihrer Wirkung abschätzen und angemessen darauf zu reagieren. Sowohl politische als auch unternehmerische Entscheidungsträger sollten aus bereits implementierten politischen Instrumenten als dauernd eingesetzte Testwerkzeuge

nutzen, ihre Wirksamkeit in kurzen Abständen im Sinne eines Lernprozesses prüfen und notwendige Anpassungen vornehmen. So führt die österreichische Regierung zum 1. Juli 2008 ein Bonus- und Malussystem für Neufahrzeuge ein, indem sie die Normverbrauchsabgabe, welche beim Kauf eines Neufahrzeugs zu zahlen ist, schrittweise ‚ökologisiert‘ – vergleichbar mit Anreizsystemen in Japan. Für Fahrzeuge mit einem CO₂-Ausstoß von über 180g pro Kilometer zahlt der Kunde einen Malus von 25 Euro pro zusätzlich emittierten Gramm und bei Fahrzeugen unter 120 g CO₂/ km gibt es einen pauschalen Bonus von 300 EUR. Die Wirksamkeit kann im obigen Sinne jederzeit überprüft werden; es findet also ein laufender Lernprozeß statt.

Systeme der Entscheidungsunterstützung sollen dabei die Unsicherheit über Verläufe und Ergebnisse zukünftiger Entwicklungen im Individualverkehr einschränken und damit das Risiko von (intuitiven) Fehlentscheidungen verringern [Meffert und Steffenhagen 1977, S. V; Frerichs und Kübler 1980, S. 1ff.; Hüttner 1982, S. 15]. Ohne eine problemadäquate Beschreibung des zu gestaltenden Systems – beispielsweise als formales Entscheidungsmodell – ist diese „gedankliche Vorwegnahme zukünftigen Handelns“ nicht möglich [Schneeweiß 1991, S. 1]. Fehlt eine derartige Darstellung, die eine Voraussage und Bewertung der Wirkungen von Systeminterventionen ermöglicht, sind zufriedenstellende Ergebnisse allenfalls zufällig zu erzielen. Aus diesen Ausführungen leitet sich der Bedarf nach einer Entscheidungsunterstützung durch eine geeignete Methode ab [Voß und Gutenschwager 2001; Zahn 1991].

Systeme zur Entscheidungsunterstützung bei sogenannten *teilstrukturierten* Problemen sind hierbei immer dann sinnvoll, wenn bestimmte begrenzte kognitive Fähigkeiten des Menschen überwunden werden können [Bunz 1988, S. 80; Morecroft 1984, S. 216]. Im Bereich *gut strukturierter* Entscheidungssituationen, zu denen zum Beispiel operative Planungsprobleme zählen, greifen unternehmerische und politische Entscheidungsträger beispielsweise auf Modelle des Operations Research zurück. Diese Softwareprogramme (z.B. LINGO, CPLEX) sind in der Lage, schnell und effizient optimale Lösungen zu finden [Turban und Aronson 2001]. Bei *schlecht strukturierten* Problemen kommen Instrumente zum Einsatz, die im angelsächsischen Raum als Decision Support Systems (DSS) bezeichnet werden. Nach Gluchowski et al. sind das meist interaktive, rechnergestützte Systeme, die Entscheidungsträger mit Modellen, Methoden und Daten in ihrem Entscheidungsprozeß unterstützen [Gluchowski et al. 1997].

Mit Hilfe solcher (stochastischer) Methoden dynamisieren unternehmerische und politische Entscheidungsträger ihre Prognosemodelle und tragen der naturgegebenen Unsicherheit damit besser Rechnung. Jede Prognose beruht auf einer Analyse der Gegenwart, die dann unter möglichst plausiblen Annahmen in die Zukunft fortgeschrieben wird. Dabei gibt es nicht nur unvorsehbare Entwicklungen, welche nicht zuletzt die Politik selbst verursacht, vielmehr fließen in die Annahmen auch unterschiedliche (wissenschaftliche) Aussagen über die gesetzmä-

ßige Ordnung ein. Diese – theoretische – Abwägung der Faktoren, auf welche die Menschen in welcher Weise reagieren, bleibt den Entscheidungsträgern nicht erspart. An dieser Stelle kommen zwangsläufig auch subjektive Urteile ins Spiel.

Genau wie in den 80er Jahren, als die Einführung des Katalysators und unverbleiten Benzins zu Diskussionen zwischen Automobilindustrie und EG-Kommission führte, treffen auch heute zum einen voneinander abweichende industrie- und umweltpolitische Interessen und zum anderen unterschiedliche Annahmen über Gesetzesfolgen aufeinander. Bei der Verbreitung neuer Techniken im Automobilsektor und den damit verbundenen hohen Entwicklungs- und Markterschließungskosten sind aber robuste Prognosen über die Wirksamkeit von Lenkungsmaßnahmen wichtige Voraussetzung für die Investitions-Planung [Nieschlag et al. 2004, S. 150; Steffenhagen 1991, S. 215; Bähr-Seppelfricke 1999, S. 1]. Dabei steigen die Anforderungen an Umfang und Qualität von Prognosen mit dem Ausmaß, der Schwere, und dem Grad der Irreversibilität zukünftiger (Entscheidungs-)folgen. Zeitverzögerungen und damit verbundene Verlängerung von Planungszeiträumen erfordern dabei langfristige Absicherungsstrategien politischer und wirtschaftlicher Entscheidungsträger [Hüttner 1986, S. 1; Frerichs und Kübler 1980, S. 1ff.].

Die Komplexität bei der Wirkungsabschätzung politischer Instrumente auf der einen und die zum Teil mangelhaften Ergebnisse durch einfache Intuition auf der anderen Seite begründen die Notwendigkeit nach einer sinnvollen Ausweitung der Anwendungsbereiche von geeigneten Methoden zur Entscheidungshilfe der strategischen Planung. Die Bewertung von Gesetzesfolgen (Impact Assessment) dient hierbei dem Ziel, die Qualität der Rechtsvorschriften zu verbessern und die Regelungsdichte zu verringern [Böhret und Konzendorf 2001]. Dieses Ziel scheint erreichbar, wenn es gelingt, problemspezifische Inhalte mentaler Datenbanken in formale Modelle zu integrieren. Nur in diesem Fall ist eine höhere Benutzerfreundlichkeit zu erwarten. Ziel ist es, Ursache-Wirkungszusammenhang zwischen politischen Instrumenten und der Zusammensetzung des Fahrzeugbestands sowie den Emissionen zu ermitteln. Dafür muß eine geeignete Methode zur Wirkungsabschätzung von politischen Instrumenten und zur Abbildung komplexer Zusammenhänge im Individualverkehr gewählt werden. Schließlich sollen aus dieser Abschätzung von Politikfolgen Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

4 Analyseinstrumente und ökonomische Kaufverhaltensmodelle

Die bisherigen Ausführungen haben die notwendigen Zielgrößen der lokal und überregional wirksamen Luftschadstoffe, die technischen, politisch-rechtlichen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen sowie geeignete Lenkungsinstrumente der Umweltpolitik identifiziert. Für die Vorhersage der Auswirkungen politischer Instrumente muß ein geeignetes Untersuchungsverfahren gefunden werden, welche einerseits Aussagen über das Verhalten der zu beeinflussenden Größen erlaubt und andererseits Einblicke in die Wirkungsstrukturen des Systems gibt.

In diesem Kapitel werden aufbauend auf der Ermittlung von Anforderungen (Abschnitt 4.1), erfolgversprechende Analyseinstrumente als Grundlage für die Entwicklung eines entsprechenden Planungsinstrumentes vorgestellt (Abschnitt 4.2. bis 4.5), bewertet und ausgewählt (4.6 und 4.7). Abschnitt 4.8 hat die Auswahl eines geeigneten Modells zur Analyse der Kaufentscheidung zum Gegenstand. 4.9 faßt die Ergebnisse kurz zusammen.

4.1 Anforderungen an ein Analyseinstrument

Um ein Werkzeug zur Unterstützung von strategischen Planungsentscheidungen im Individualverkehr zu entwickeln, sind zunächst die Anforderungen an ein geeignetes, planmäßiges Vorgehen aufzuführen. Die Anforderungen orientieren sich dabei am Zweck der durchzuführenden Prognose.

Das innerhalb der Planungsaufgabe betrachtete System ist dynamisch und komplex. Systeme sind dynamisch und komplex, wenn sie folgende Eigenschaften besitzen [Vennix 2001; Forrester 1971b]:

- Systeminterventionen haben oft nur kurzfristigen Erfolg, bevor langfristige Effekte die ursprünglich positive Wirkung ins Gegenteil verkehren.
- Ursache und Wirkungsbeziehungen sind nicht direkt ersichtlich¹⁰⁶.
- Systeminterventionen an einem Ort des Systems (Subsystem) wirken sich anders aus, als an einem anderen – übergeordneten – Ort des Systems.
- Offensichtliche Lösungen scheitern oder verschlimmern die Situation („policy resistance“).

Beleg für die dynamische Komplexität des vorliegenden Problems ist der Verlauf der Abgas- und CO₂-Emissionen sowie die Entwicklung von Fahrzeugantrieben und alternativen Kraftstoffen nach kombiniertem Instrumenteneinsatz. Kurzfristig führen Verschrottungsprämien möglicherweise zu Schadstoffminderungen, langfristig erhöhen sich aber eventuell die Fahleistungen und damit die Emissionen der erneuerten Fahrzeugflotte. Die Auszahlungen

¹⁰⁶ Diese von Forrester als ‚counterintuitive behaviour‘ bezeichneten Entwicklungsmuster zeigen sich unter anderem in insensitivem Verhalten gegenüber Parametern, die für wesentliche Stellschrauben gehalten wurden und dem Auftreten unerwarteter reaktionssensibler Parameter [Forrester 1971b].

können zudem zu Unwirtschaftlichkeit führen. Auch die langfristigen Wirkungen einer Bonus-/ Maluszahlung sind nicht ohne weiteres zu beurteilen. Kurzfristig sind gegebenenfalls höhere Kosten für Bonuszahlungen in Kauf zu nehmen, langfristig könnte dies jedoch durch die Maluszahlungen überkompensiert werden. Wie diese Interdependenzen tatsächlich wirken, ist jedoch unklar.

Die Planungsaufgaben sind meist neu. Das jeweilige Gesetz wurde noch nicht implementiert. So hat die Wirkungsabschätzung sowohl bekannter als auch bisher unbekannter umweltpolitischer Maßnahmen in der Vergangenheit in den meisten Unternehmen keine Rolle gespielt; auch der Staat selbst hat die Wirkungen seiner Politik nur unzureichend prognostiziert. Im Gegensatz zur strategischen Planung im Bereich der Produktion und Logistik liegen hier wenige Erfahrungen vor.

Der Planungszeitraum ist lang. Maßnahmen zur Senkung von Abgas- und CO₂-Emissionen sind für einen sehr langen Zeitraum zu gestalten. Maßgeblich ist hierbei die Nutzungsdauer von langlebigen Produkten, hier Fahrzeugen. Deshalb bestehen hohe Unsicherheiten. Die Vorhersage des Systemverhaltens über einen Zeitraum von 30 Jahren ist notwendig, um langfristige Auswirkungen der getroffenen Maßnahmen zu beobachten. Da Prognosen mit einem Zeitraum von weniger als einem Jahr als kurzfristig gelten, und als langfristige solche bezeichnet werden, die einen Zeitraum von mehr als drei Jahren haben, muß bei der durchzuführenden Prognose eine Methode für die langfristige Vorhersage gewählt werden [Ohl 2001, S. 221; Forrester 1972, S. 13ff.].

Viele Entscheidungen wirken langfristig und sind zum Teil nicht umkehrbar. Zu diesen Entscheidungen gehört etwa die Finanzierbarkeit von politischen Instrumenten nach einer Überreaktion von Marktteilnehmern. Die Abbildung von Rückkopplungen und nichtlinearen Zusammenhängen zwischen den Systemvariablen ist unbedingt erforderlich.

Die Planungsaufgabe ist schlecht strukturiert. Die Aufgabe der Wirkungsabschätzung politischer Maßnahmen als neuartiges und komplexes Problem ist von erheblicher Bedeutung für produktverantwortliche Unternehmen und zählt zu den schlecht strukturierten Planungsaufgaben. Diese Planungsaufgaben haben kein standardisiertes System zur Aufgabenbearbeitung und Entscheidungsfindung. Eine vollständige Automatisierung der Problemlösung ist so nicht möglich, wodurch die Kreativität und die Intuition des Entscheidungsträgers besonders gefordert werden [Gluchowski et al. 1997].

In den Entscheidungsprozeß ist eine *Vielzahl von Entscheidungsträgern* einzubinden. Diese politisch und unternehmerisch Handelnden können dabei zuwiderlaufende Ansichten über die zu lösenden Probleme sowie über die zu verfolgenden Ziele und Strategien besitzen. Das zu entwickelnde Instrument zur Unterstützung von Entscheidungen sollte aus diesem Grund das Verständnis über das Zusammenwirken der Systemelemente im Individualverkehr und das

sich daraus ergebende Systemverhalten fördern und dabei helfen, daß die an der Planung beteiligten Akteure in der Lage sind, effektive Strategien abzuleiten.

Die Probleme erfordern die Entwicklung von *robusten Strategien*. Eine robuste Strategie besitzt die Eigenschaft, daß sie auch bei Eintritt der schlechtesten Umweltentwicklung zu einem stabilen Ergebnis führt [Scholl 2001; Schneeweiß 1990]. Die Akzeptanz eines Ergebnisses kann sich auf diese Weise in einem zum Zeitpunkt der Strategiefindung definierten, mindestens zu erreichenden Ziel ausdrücken. Die Flexibilität des zu gestaltenden Systems und der gewählten Methode bei der Anpassung von politischen Maßnahmen im Zeitverlauf spielt hier eine wesentliche Rolle. Flexibilität bezeichnet dabei die Fähigkeit, sich unvorhergesehenen Änderungen bestmöglich anzupassen [Schneeweiß 1992].

In sozioökonomischen Systemen wie dem Individualverkehr sind meist *dynamische* Verhaltensmuster in Form von Zeitverzögerungen erkennbar, sodaß das Modell diese auf Veränderung gerichteten Kräfte implizit abbilden muß. *Statische* Verhaltensmuster sind demgegenüber nicht zur Abbildung sozioökonomischer Systeme geeignet, da sie nur zeitpunktbezogene Betrachtungen erlauben. Die Darstellung von Rückwirkungen und Verstärkungseffekten im Zeitverlauf ist dabei nur mit Hilfe von mathematisch *mehrstufigen* nichtlinearen Modellen realisierbar, analytisch *einstufige*, lineare Modelle treffen grundsätzlich nur Aussagen zu einer einzelnen endogenen Größe [Milling und Maier 1996, S. 45]; sie treffen ausnahmsweise Feststellungen zu mehreren Größen, wenn sich diese zum Beispiel aus einer Kuppelproduktion ergeben. In der Umsetzung erfordert dies die Verwendung *rückkoppelnder Wirkungsbeziehungen*.

Die zeitlichen Verläufe der zu prognostizierenden Größen sollen sowohl auf Basis „harter“ als auch „weicher“ Faktoren ermittelt werden. Beim Grad der Operationalität ist dementsprechend eine Koexistenz von *quantitativen und qualitativen Daten* zu wählen. Die vorhandenen Informationen und Verknüpfungen müssen in einer *Gesamtsystemstruktur* vereint werden, damit eine langfristige Prognose von Variablen möglich ist, die sich aus dem Zusammenhang mehrerer Einflußfaktoren ergibt. Einstufige, analytische Singulärprognosen werden der Komplexität der Realität nicht gerecht und können dynamisches Verhalten nur kurzfristig prognostizieren [Liebert 2001, S. 40ff., 128].

Eingriffe in das System zur Veränderung der Zielgrößen erfordern eine *kontinuierliche Anpassung* der Bestimmungsgrößen an das Systemverhalten, der Lenkungsingriff muß im Prinzip zu jeder Zeit möglich sein. Bei kontinuierlichen Systemen erfolgt die Beschreibung der Ereignisse in stetigen Strömen, diskrete Systeme gründen sich auf einzelne Ereignisse [Markridakis et al. 1998, S. 10, S. 534; Liebert 2001, S. 38; Hering et al. 1989, S. 7].

Für die Prognose des Diffusionsverlaufs von Techniken sowie die darauf aufbauenden Modelle zur Prognose über die Veränderung von Marktanteilen ist ein nach festen Regeln geordnetes Verfahren notwendig, welches *kausale Zusammenhänge* der einzelnen Beeinflussungsfak-

toren analysiert. Rein deskriptive Modelle und die meisten Zeitreihenprojektionen sind für die Prognose von zukünftigen Technologieentwicklungen ungeeignet, da die Zusammenhänge neu und noch nicht quantitativ erfaßt worden sind. Die Prognose erfordert daher ein *Systemverständnis*, da einzelne Kausalzusammenhänge durch die *Wirkungsstruktur* detailliert erläutert werden. Die detaillierte Struktur ist auch Grundlage für die Diskussion und eventuelle Veränderungen, die sich daraus ergeben [Makridakis 1998, S. 9, Brockhoff 1977, S. 14ff.].

Einzelne Systemvariablen beruhen aufgrund der Neuartigkeit des Prognoseproblems und des teilweise *unzureichend verfügbaren Datenmaterials* auf Hypothesen. Diese Hypothesen werden mittels *Expertenaussagen und Erfahrungswissen* getroffen, die bekannten Zusammenhänge hingegen auf Grundlage *historischer Daten*. Das führt zur Notwendigkeit eines Prognoseinstruments, das sowohl genaue Zahlenwerte (deterministische Sachverhalte) als auch Wahrscheinlichkeitsverteilungen (stochastische Sachverhalte) in die Vorhersagen einbezieht. Als Konsequenz ergibt sich im Hinblick auf das Prognoseergebnis, daß *keine punktgenaue Prognose* ermittelt werden soll, sondern vielmehr eine Tendenz, die eine Wirkungsabschätzung der eingesetzten Mittel zuläßt [Hering et al. 1989, S. 6ff.]. Computersimulationen ermöglichen dabei eine einfache Kontrolle und Anpassung der Bezugsgrößen [Meadows 1980, S. 27].

Rückschlüsse auf das Prognoseergebnis erfolgen zum einen auf Grundlage von *intuitiven Beurteilungen*. Zum anderen werden Prognosen mittels Optimierung aus einem *analytischen Prognosemodell* abgeleitet. Schließlich kann zur Ableitung von Prognoseergebnissen ein *simulationsfähiges Prognosemodell* herangezogen werden.

In Tabelle 4-1 sind alle genannten Anforderungen noch einmal nachgebildet:

Tabelle 4-1: Klassifizierung von Modellen [Eigene Darstellung nach Liebert 2001, S. 38]

Kriterien	Mögliche Ausprägungen (Notwendige Ausprägungen: grau unterlegt)		
Zeitlicher Bezug	Statisch	Dynamisch	
Mathematische Kompaktheit	Analytisch, einstufig	Mehrstufig, mit Rückkopplung	
Beziehung zwischen den Variablen	Linear	Nichtlinear	
Zeitraum	Kurzfristig	Mittelfristig	Langfristig
Grad der Operationalität	Nur quantifizierbare Parameter	Nur qualitative Elemente	Mischform
Konsistenz	Singulär	System	
Zeitliche Entwicklung	Kontinuierlich	Diskret	
Erklärungsgehalt	Kausal	Deskriptiv	
Erklärungsgrundlage	Wirkungsstruktur	Verhalten	Zeitreihenbasiert
Datenbedarf	Niedrig	Hoch	
Informationsbasis	Historische Daten	Erfahrungswissen	
Bestimmtheit der Parameter	Deterministisch	Stochastisch	
Datengrundlage	Punktprognose	Intervallprognose	
Prognosegrundlage	intuitiv	analytisch	simulativ
Endogene Variable	unabhängig	rekursiv	interdependent

Aus den genannten Anforderungen kann nun ein geeignetes Analyseinstrument für das beschriebene Problem identifiziert und ausgewählt werden.

4.2 Einordnung von Analyseverfahren

Je nach Ziel unterscheiden sich Analyseinstrumente in normative und explorative Untersuchungsverfahren. Die hier nicht weiter untersuchten normativen Analyseverfahren (Backcasting) ermitteln Maßnahmen, die ergriffen werden müssen, um einen bestimmten Zustand in der Zukunft zu erreichen. Die anderen Arbeitsweisen entwickeln ausgehend von der aktuellen Situation mögliche Entwicklungen in der Zukunft (Forecasting). Prognosen unterscheiden sich anhand einer Vielzahl von Kriterien. In der Literatur ist daher auch eine Reihe unterschiedlicher Klassifizierungen zu finden. Es erscheint sinnvoll, die wichtigsten Kriterien zunächst kurz zu erläutern. Nach den Ausprägungen unterscheiden sich Prognosetechniken im Wesentlichen in

- qualitative und quantitative Analyseverfahren,
- Entwicklungs- und Wirkungsprognosen,
- kurz-, mittel- und langfristige Prognosen,
- Singulär- und Systemprognosen,
- univariate und multivariate Methoden,
- Punkt- und Intervallprognosen und
- lineare und nichtlineare Prognosen

[Ohl 2000, S. 51ff., S. 220; Frerichs und Kübler 1980, S. 7].

Bei der Klassifizierung der bestimmten Vorgehensweisen ist die Art der Verknüpfung der Variablen ein wichtiges Kriterium. Bei qualitativen Prognosen erfolgt diese Verknüpfung verbal und nicht-numerisch, indem auf Grundlage von Expertenaussagen Art und Richtung der zu prognostizierenden Variable bestimmt werden [Ohl 2000, S. 221]. Die subjektive Einschätzung (Intuition) des Sachverständigen bestimmt in entscheidendem Maße das Prognoseergebnis und macht es damit weniger transparent. Quantitative Analysen beruhen auf Meßverfahren, die die genaue Spezifikation der zugrundegelegten Modellannahmen erfordern. Die Verknüpfung der veränderlichen Modellgrößen erfolgt dabei mit Hilfe mathematischer Operatoren in Gleichungssystemen. Art und Inhalt der mathematisch-wissenschaftlichen Modellannahmen sind hier zwar ebenfalls das Ergebnis einer subjektiven Beurteilung, die Prognosen sind aber auf Grundlage der angegebenen Modellalgorithmen auch durch Außenstehende transparent und objektiv nachprüfbar [Meffert und Steffenhagen 1977, S. V; 4, Frerichs und Kübler 1980, S. 4].

Entwicklungsprognosen sind dadurch charakterisiert, daß sie die zu prognostizierende Größe in Abhängigkeit von Variablen nachbilden, die das prognostizierende Subjekt nicht kontrolliert. Bei der Prognose der Absatzmenge in Abhängigkeit von der Zeit bleiben so zum Beispiel Wirkungszusammenhänge zwischen einzelnen Variablen, wie der Einfluß von Marke-

tingmaßnahmen, unberücksichtigt. Wirkungsprognosen betrachten die kausalen Zusammenhänge zwischen der zu prognostizierenden Größe und den auf sie einwirkenden Variablen. Die Betrachtung konzentriert sich auf diejenigen Variablen, die das prognostizierende Subjekt direkt kontrollieren kann. Die kombinierte Entwicklungs- und Wirkungsprognose beinhaltet sowohl die zeitliche Entwicklung, als auch die Auswirkung getroffener Entscheidungen. Um Maßnahmen im Zeitverlauf untersuchen zu können, ist eine Kombination von Entwicklungs- und Wirkungsprognosen notwendig [Hüttner 1986, S. 2; Ohl 2000].

Ein weiteres Kriterium bei der Unterscheidung und der Auswahl von Prognosemechanismen ist die Länge des Prognosezeitraums in kurz-, mittel- und langfristige Prognosen, wobei eine ausdrückliche Zuordnung von Tagen, Monaten oder Jahren keine Allgemeingültigkeit besitzt. Je nach Branche und Entscheidungsebene im Unternehmen variieren die Planungszeiträume. Entscheidend für die Wahl des Prognosezeitraums ist die zu betrachtende Entscheidung und deren zeitliche Auswirkung, über die – mittels der Prognose – Informationen zur verbesserten Entscheidungsfindung ermittelt werden sollen. Häufig werden Prognosen mit einem Zeitraum von weniger als einem Jahr als kurzfristig und solche Methoden mit einem Zeitraum von über drei Jahren als langfristig bezeichnet [Hüttner 1986, S. 4; Ohl 2000, S. 220]. Kurzfristige Prognosen ziehen besonders Befragungen oder Zeitreihenprojektionen heran. Mittelfristige Prognosen versuchen insbesondere den Wachstumspfad (Trend) zu erfassen und vernachlässigen dabei gemeinhin die durch konjunkturelle Einflüsse ausgelösten Schwankungen (z.B. Expertenprognosen, Trendextrapolation, iterative Systemprognosen, ökonometrische Prognosemodelle). Gegenstand langfristiger Prognosen sind die grundlegenden Veränderungen der Wirtschaftsstruktur, etwa im Zusammenhang mit der Entwicklung neuer Techniken oder der Erschöpfung bestimmter Ressourcen (z.B. Expertenprognosen, systemdynamische Untersuchungsverfahren, Input-/Output-Analyse, ökonometrische Prognosemodelle) [Frerichs und Kübler 1980, S. 4ff.].

Die Betrachtung der Systemgrenzen bezieht sich auf die Betrachtung von Einwirkungen der Bezugsgrößen auf das System. Geschlossene Systeme sind in sich abgegrenzt und treten nicht in Wechselwirkung mit der Umwelt (Singulärprognose). Offene Systeme stehen in Wechselwirkung mit der Umwelt, es wirken externe Bezugsgrößen auf sie ein und beeinflussen damit das Verhalten des Systems (Systemprognose). Reale ökonomische Systeme sind in der Regel den offenen Systemen zuzuordnen.

Univariate Prognosesysteme beziehen nur die Zeitreihe der zu prognostizierenden Variable ein, das Modell nutzt für die Prognose dieser Größe lediglich eine erklärende Variable. Multivariate Techniken verwenden mehrere Zeitreihen. Die untersuchte Variable wird mit anderen – aufgrund theoretischer Begründungen als kausal angenommenen – Einflußgrößen verknüpft [Hüttner 1986, S. 4].

Punktprognosen suchen nach einem bestimmten Wert, den die zu prognostizierende Variable an einem festen Zeitpunkt in der Zukunft annimmt. Intervallprognosen liefern Werte, die eine

bestimmte Spannbreite aufweisen. Ziel ist es, eine Spanne zu bestimmen, in der die Variable mit möglichst hoher Wahrscheinlichkeit in Zukunft anzutreffen ist [Frerichs und Kübler 1980, S. 89].

Die univariaten und multivariaten Prognosen können sowohl lineare als auch nichtlineare Gleichungssysteme enthalten. Zur Vereinfachung nimmt die Zeitreihenanalyse häufig lineare Zusammenhänge an. Bei komplexen Problemen können lineare Modelle jedoch unangemessen sein. Bei den nichtlinearen Prognosemodellen sind die neuronalen Netze das bekannteste Forschungsverfahren, das die Modellierung nichtlinearer Zusammenhänge ermöglicht [Ohl 2000, S. 220].

Aus den genannten Kriterien kann eine umfassende Einordnung der zur Verfügung stehenden Analyseinstrumente abgeleitet werden (siehe Abbildung 4-1):

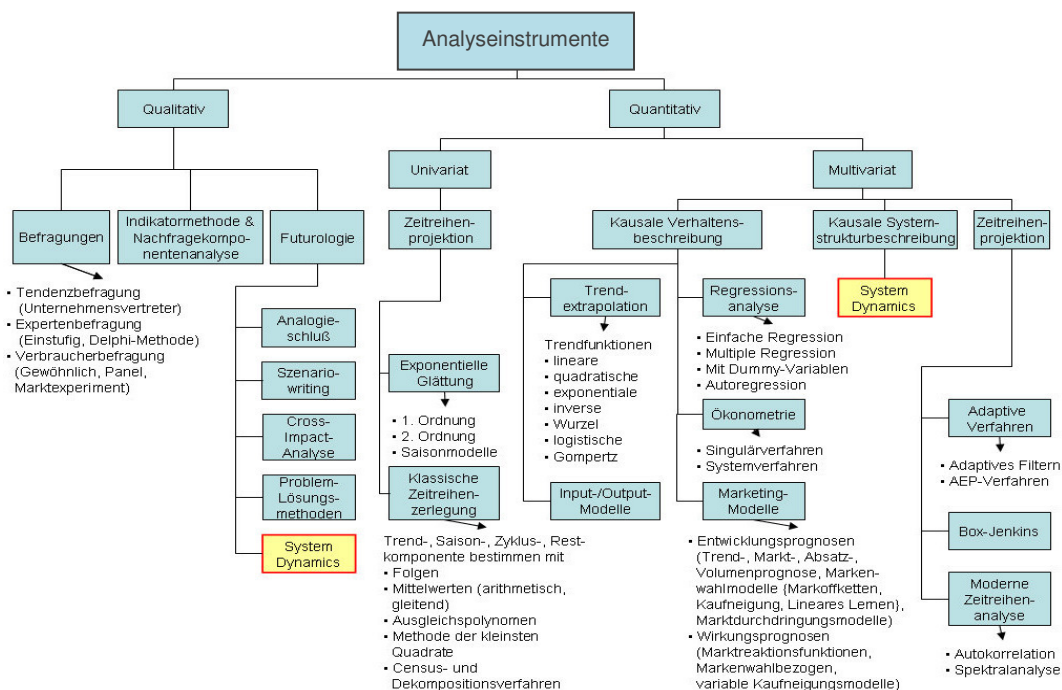


Abbildung 4-1: Einordnung der Analyseinstrumente [Eigene Darstellung nach Hüttner 1986, S. 1ff.; Bossel 1992, S. 29ff.; Makridakis et al. 1998, S. 10ff.]

Der Aufwand zur Datenbeschaffung, -aufbereitung und -auswertung richtet sich nach Art und Umfang der für die Anwendung der Methode benötigten Daten, sowie der Art der Datenerhebung (Interviews, Fragebögen, Data Mining etc.). Darüber hinaus sind einige Untersuchungsverfahren auf spezielle Anwendungen zugeschnitten (z.B. Wirtschaftspolitik/ Unternehmensstrategie) und eine Übertragbarkeit auf andere Domänen ist nur eingeschränkt oder gar nicht möglich. In Bezug auf die Abhängigkeit der endogenen Variablen voneinander unterscheiden Prognosemodelle zudem in unabhängige, rekursive und interdependente Modelle. In unabhängigen Modellen sind die einzelnen endogenen Größen jeweils nur von exogenen Größen abhängig. In rekursiven Modellen sind die endogenen Größen sowohl von den exogenen Grö-

ßen als auch von den weiteren endogenen Größen in Form von Kausalketten abhängig. Bei interdependenten Modellen besteht eine funktionale Abhängigkeit der endogenen Größen sowohl von den exogenen Größen als auch von den anderen endogenen Größen, wobei die endogenen Größen wechselseitig vernetzt sind und ein Kausalnetz bilden.

Die Unterscheidung der Methoden erfolgt nach *qualitativen* und *quantitativen* Maßstäben getrennt, da dies das wesentliche Unterscheidungsmerkmal ist.

Qualitative Methoden unterscheiden sich von den quantitativen Ansätzen dadurch, daß sie nicht auf der zahlenmäßigen Vergangenheit der betreffenden Zeitreihe oder einer mit ihr in Wechselbeziehung stehenden Reihe basieren, sondern vielmehr auf semantische Bewertungen zurückzuführen sind. Diesen kann in einem zweiten Schritt eine Zahl zugeordnet werden, wodurch sie praktisch quantifiziert werden. Qualitative Methoden umfassen die Futurologie, den Analogieschluß, die Szenariotechnik, die Cross-Impact-Methode sowie die sogenannten Problemlösungsmethoden. Zu den qualitativen Prognosetechniken zählen weiterhin die Gruppe der Befragungsmethoden sowie der Bereich der Indikatormethode und der Nachfragekomponentenanalyse [Hüttner 1986, S. 235ff., Bossel 1992, S. 29f.; Brockhoff 1977, S. 36, 135; Barth 1974, S. 215ff.].

Die sogenannte Zukunftsforschung oder *Futurologie* beschäftigt sich mit den langfristig zu erwartenden Entwicklungen auf technischem, wirtschaftlichem und sozialem Gebiet. Sie will damit in der Hauptsache alternative Entwicklungsmöglichkeiten aufzeigen und Hilfe zur Entscheidungsunterstützung liefern [Makridakis et al. 1998, S. 558ff.; Meadows 1972, S. 14ff.]. Der *Analogieschluß* ist ein nach festen Regeln geordnetes Verfahren, bei der aus einer gemeinsamen Eigenschaft zweier Systeme weitere Übereinstimmungen gefolgert werden. Hierbei ist das bekannte System in der Entwicklung weiter vorangeschritten und ermöglicht Rückschlüsse auf das unbekannte System. Komplexe Systeme sind jedoch selten lückenlos vergleichbar, so daß die Methode von den weiteren Betrachtungen ausgenommen wird [Hüttner 1986, S. 251f.; Duncan et al. 2001, S. 197ff.].

Die *Szenario-Technik* bildet im sogenannten Trendszenario die Entwicklung unter Annahme stabiler Umweltbedingungen ab. Infolge instabiler Umwelteinflüsse werden dabei sowohl positive als auch negative Entwicklungsmöglichkeiten in Form eines Szenariotrichters berücksichtigt [Hüttner 1986, S. 252; Makridakis et al. 1998, S. 472f.]. Die sogenannte Cross-Impact-Analyse kommt meist im Rahmen der Szenario-Technik zum Einsatz und bildet Wechselwirkungen (engl. cross impact) zwischen verschiedenen, zukünftig möglichen Ereignissen ab. Szenario-Technik und Cross-Impact-Analyse sind als Singulärprognosen einzustufen und für die folgenden Betrachtungen nicht geeignet [Liebl 1995, S. 78ff.; Götze 1993, S. 71ff.; Rowe und Wright 2001, S. 127f.].

Die *morphologische Analyse* und die damit vergleichbare Relevanzbaumanalyse sind Prognosetechniken, um komplexe Probleme aufzutrennen und mit Hilfe von Matrizen („Mor-

phologischer Kasten“) und Hierarchieebenen nachzuvollziehen. In einer Matrix ist jede Kombination von Einflußgrößen und Merkmalsausprägungen eine theoretisch mögliche Lösung. Die beiden Methoden finden als Prognosetechnik nur eingeschränkt Verwendung. Vielmehr sind es genau wie das sogenannte Brainstorming Kreativitätstechniken, welche alternative Lösungen aufzeigen sollen [Schulte-Zurhausen 1995, S. 562f.; von Deym 1992, S. 158f.; Schmidt 1994, S. 277].

Die Methode *systemdynamischer Simulationsmodelle* (,System Dynamics') untersucht zwar ,qualitative' Zusammenhänge in Form von Kausalschleifen (,causal loops'), soll jedoch im Rahmen der Futurologie nicht genauer beschrieben werden. Eine Beschreibung der wesentlichen Charakteristika erfolgt in Abschnitt 4.4.5.¹⁰⁷

Nutzwertanalytische Ansätze beruhen auf (Experten-)befragungen und übersetzen die Antworten mit Hilfe eines standardisierten Fragebogens oder in einem freien Gespräch in ein nominales Maß [Hüttner 1982, S. 29f.; Grunwald 2002, S. 210]. Ziel der Delphimethode, einer Spezialform der Expertenbefragung, ist es, eine gewisse Kongruenz bei den Experteneinschätzungen zu erreichen [Armstrong 2001, S. 130f.]. Die Expertenbefragung birgt indes stets die Gefahr von intuitiven Antworten (,Raten'), ohne das Ergebnis wissenschaftlich zu belegen [Sauer 2000; Zumkeller et al. 2001; Kuchenbecker 1999, S. 44; Hüttner 1997, S. 68ff.].

Indikatorprognosen versuchen anhand der zeitlichen Entwicklung eines beeinflussenden Faktors den Verlauf der abhängigen Variable vorherzusagen [Brockhoff 1977, S. 87; Hüttner 1980, S. 16ff.]. Die Prognose gestaltet sich insofern schwierig, als das sich die relevanten Indikatoren teilweise nur schwer ermitteln lassen. [Hüttner 1986, S. 236ff.; Backhaus 2000, S. 16ff.; Frerichs und Kübler 1980, S. 6]. Als Singulärprognose findet die Indikatorenmethode im Folgenden keine Berücksichtigung.

Die *Nachfragekomponentenanalyse* zielt darauf ab, die mögliche langfristige Entwicklung der Abnehmergruppen zu untersuchen und Rückschlüsse für den eigenen Absatz zu ziehen. Sie spaltet die Prognosevariable in Komponenten auf und bildet für jede Komponente einen spezifischen Regressionsansatz (siehe Abschnitt 4.4.3). Die Prognose ist statisch, da sie nur für den Endzeitpunkt des Planungszeitraum erfolgt [Hüttner 1986, S. 245ff.]. Da keine Punktprognosen erstellt werden sollen, wird diese Arbeitsweise in den weiteren Betrachtungen nicht berücksichtigt.

Quantitative Methoden sind in uni- und multivariate Analysemethoden geteilt. *Univariate Zeitreihenprojektionen*, wie die exponentielle Glättung und die klassische Zeitreihenzerlegung, versuchen ein statistisch ermitteltes Entwicklungsmuster „herauszuschälen“ und von Zufallsbeobachtungen in den Daten zu unterscheiden; sie sind wegen der kurzfristigen Be-

¹⁰⁷ In den USA wurde diese Methode zunächst ,Industrial Dynamics' genannt. Die Bezeichnung ist indes irreführend, da System Dynamics auf unterschiedliche Probleme anwendbar ist (z. B. Entwicklung von Diabetes).

trachtung einer einzigen Variable für die Erklärung wichtiger Kausal- und Systemzusammenhänge wenig aussagekräftig [Makridakis 1980, S. 53ff.; Makridakis 1989, S. 66ff.]. Zur Lösung komplexerer sozioökonomischer und marktorientierter Fragen sind besonders quantitative, *multivariate* Analysemethoden von Bedeutung, weil sie – EDV-gestützt – mehrdimensionale Zusammenhänge mehrerer Variablen analysieren und erklären [Kamenz 2001, S. 190]. Multivariate Prognosetechniken lassen sich in drei weitere Gruppen untergliedern.

Die erste Untergruppe nimmt multivariate Projektionen von Zeitreihen vor. Dazu zählen im wesentlichen die adaptiven Verfahren, der Box-Jenkins-Ansatz und die Verfahren der modernen Zeitreihenanalyse (Autokorrelations- und Spektralanalyse) [Backhaus 2000, S. 2ff.; Hüttner 1986, S. 77ff.]. Auch multivariate Zeitreihenprojektionen betrachten die Entwicklung als Teil eines kybernetischen Systems mit unbekanntem innerem Aufbau („Black Box“), von dem nur die Reaktion am Ausgang auf ein bekanntes Signal am Eingang überprüfbar ist [Makridakis et al. 1998, S. 11; Bretzke 1975, S. 126f.]. Die Betrachtung beschränkt sich demzufolge auf den Systemoutput und behandelt die zu prognostizierende Größe einzeln und unter Vernachlässigung wichtiger Gesamtzusammenhänge (keine Strukturvalidierung) [Frerichs und Kübler 1980, S. 34f. Makridakis et al. 1998, S. 11ff.]. Zu multivariaten Zeitreihenprojektionen wird unter anderem auf die einschlägige Literatur von Backhaus verwiesen [Backhaus 2000, S. 2ff.; Makridakis 1980, S. 81, 147ff.; Makridakis 1989, S. 133ff.].

Die zweite Untergruppe besteht aus Methoden der (kausalen) Verhaltensbeschreibung. Solche Ansätze untersuchen die kurz- und mittelfristigen Wirkungszusammenhänge zwischen der zu prognostizierenden Variable und einer oder mehrerer unabhängiger Variablen auf Grundlage von statistisch ermittelten Zeitreihen. Die Zusammenhänge der Gesamtsystemstruktur analysiert diese Methode jedoch nicht. Zu den wichtigsten Methoden der kausalen Verhaltensbeschreibung zählen auf der einen Seite Trendextrapolationen und Input-Output-Modelle, auf der anderen Seite regressionsanalytische Ansätze, ökonometrische Verfahren und die üblichen Entwicklungs- und Wirkungsprognosen des Marketing [Makridakis et al. 1998, S. 10ff.; Hüttner 1986, S. 235ff.; Bossel 1992, S. 29f.].¹⁰⁸

Trendprognosen beschreiben die Entwicklungsrichtung einer Zeitreihe mit Hilfe eines mathematischen Modells. Ein in der Vergangenheit beobachteter Trend und damit die statistisch ermittelte Entwicklungsrichtung der zu untersuchenden Variable wird in die Zukunft fortgeschrieben, was im Vergleich zu den obenstehenden Glättungsverfahren bedeuten soll, daß hier flexiblere Formen der Fortschreibung einer Zeitreihe einbezogen und bessere Methoden der Parameterschätzung verwendet werden [Frerichs und Kübler 1980, S. 38]. Die Wachstums- und Sättigungsmodelle eignen sich somit zur Trendextrapolation von Zeitreihen, deren Struk-

¹⁰⁸ Die betriebswirtschaftlichen Verfahren der Investitionsrechnung (z.B. Gewinnvergleichsmethode, Rentabilitätsrechnung oder dynamische Kapitalwertmethode) kommen bei Verkehrsinvestitionen zur Anwendung und sind auch unter die Methoden der (kausalen) Verhaltensbeschreibung einzuordnen. Nachteilig ist die Nichtberücksichtigung externer Effekte, die Eindimensionalität, die Konzentration auf Zahlungsströme und die unzureichende Abbildung von Unsicherheiten [Kuchenbecker 1999, S. 43].

tur sich nicht mit einem einfachen linearen oder quadratischen Trend beschreiben lassen. Vielmehr ist dieser Ansatz zur langfristigen Prognose von makroökonomischen Variablen (z.B. Energieversorgung, Rohstoffvorkommen) und zur Planung des Lebenszyklusprozesses von Konsum- und Investitionsgütern geeignet [Hansmann 1983, S. 123f.].

Die Regressionsanalyse ist im Marketing und auch in der Auswertung statistisch erhobener Mobilitätskennziffern (Makrodaten) sehr verbreitet und dient der Untersuchung einer abhängigen metrischen Variablen Y und einer oder mehrerer unabhängiger metrischer Variablen x_i . Ziel der Regressionsanalyse ist

- die Erkennung und Erklärung von Kausalzusammenhängen und
- die Schätzung der Werte der abhängigen Variablen

Die Regressionsanalyse unterscheidet die einfache und die multiple Regression. Der Unterschied zu Zeitreihenanalysen besteht in der Anzahl der Variablen, von denen die zu prognostizierende Variable abhängt. Nach Art der Beziehung zwischen den Variablen wird zwischen linearen und nichtlinearen Methoden unterschieden. Bei der Regressionsanalyse muß zunächst der zugrundeliegende Ursache-Wirkungszusammenhang bestimmt werden. Danach erfolgt die Schätzung der Regressionsfunktion, mit deren Hilfe die Abhängigkeit der Variablen in eine mathematische Gleichung überführt wird. Im letzten Schritt wird dann die Regressionsfunktion überprüft, inwieweit sie einen Beitrag zum Erreichen des Untersuchungsziels liefert [Backhaus 2000, S. 2ff.; Hautzinger et al. 2005, S. 79]

Input-Output-Analysen gründen sich auf Input-Output-Tabellen, die den Fluß von Größen der Zeilen hin zu den Spalten wiedergeben, z.B. Stoffströme zwischen einzelnen Produktionssektoren. Input-Output-Analysen erfassen hierbei nicht nur direkte Einflüsse, sondern auch indirekte Bewegungen und Ströme. Die zu prognostizierenden Größen sind dabei die Leistungsausgaben der einzelnen Sektoren. Die Input-Output-Tabelle ermittelt dementsprechend alle Leistungen und Gegenleistungen zwischen den verschiedenen Sektoren und den Endkunden, von der Rohstoffentnahme bis zur Fertigware. Ökobilanzen liefern die erforderlichen Informationen. Der Nachteil von Input-Output-Tabellen ist die meist kurz- bis mittelfristige Perspektive sowie die Notwendigkeit sehr detaillierter Eingangsdaten [Grunwald 2002, S. 219].

Mikrosimulationsmodelle betrachten mikroökonomische Zusammenhänge und werden häufig zur Untersuchung fiskalpolitischer Maßnahmen eingesetzt. Die Modelle nutzen Daten repräsentativer Stichproben der Bevölkerung (z.B. Alter, Geschlecht, Einkommen) als Eingangsgrößen, um die wirtschaftlichen Auswirkungen (z.B. Steuererhöhung auf Haushalte) zu untersuchen. Mikrosimulationsmodelle sind in ihrem Anwendungsbereich eher eingeschränkt.

Neben Input-/Output-Analysen, Mikrosimulationsmodellen eignen sich ökonometrische Modelle zur dynamischen Prognose und Analyse (verkehrs)wirtschaftlicher Effekte. Die Ökonometrie als spezielles Teilgebiet der Wirtschaftswissenschaften ist die Verbindung zwischen ökonomischer Theorie, empirischer Wirtschaftsforschung und mathematisch-statistischen

Methoden. Ausgangspunkt der ökonometrischen Forschung ist die Gründung der ‚Econometric Society‘ im Jahr 1930 in Cleveland, USA [Eckey et al. 2001, S. 289ff.; Kuchenbecker 1999, S. 65ff.; van Herbruggen 2002, S. 2; Zahn 1973, S. 613]. In ökonometrischen Modellen ist es wegen Schätz- und Rechenproblemen zumeist schwieriger, nichtlineare Zusammenhänge abzubilden. Zudem benötigen ökonometrische Verfahren umfangreiches Datenmaterial zur Schätzung und Validierung der Parameter. Die Güte des Datenmaterials spielt hierbei eine entscheidende Rolle für die Qualität der Modellierung. Dabei ist zu berücksichtigen, daß es sich bei den Modellkoeffizienten nur um Punktschätzungen der wirklichen Parameter handelt. Ökonometrische Modelle werden als verfahrensorientiert, nicht als problemorientiert bezeichnet, da sie weder Einflußgrößen berücksichtigen können, für die keine ausreichende Datengrundlage vorhanden ist, noch in der Lage sind, nicht meßbare qualitative Daten zu erfassen. Ziel ökonometrischer Modelle ist eine möglichst exakte Modellierung des realen Systemverhaltens, jedoch nicht die Abbildung der zugrundeliegenden Struktur [Kuchenbecker 1999, S. 67f.; Meadows 1980, S. 38ff., 43ff.].

Die dritte Untergruppe umfaßt die (kausalen) Systemstrukturverfahren. Mit Hilfe dieser systemkybernetischen Verfahren ist es möglich, Rückkopplungen innerhalb der Gesamtsystemstruktur (z.B. Verkehrssektor) zu erfassen und die Auswirkungen von Veränderungen einzelner Systemvariablen zu analysieren („Glass Box“). Kybernetik oder Regelungstheorie definiert sich nach Flechtner als „allgemeine formale Wissenschaft von der Struktur, den Relationen und dem Verhalten dynamischer Systeme“. Die Systemparameter werden anders als bei den Methoden der kausalen Verhaltensbeschreibung nicht anhand von Zeitreihen, sondern mit Hilfe der Systemstruktur selbst berechnet [Flechtner 1969, S. 10; Meadows 1980, S. 32; Conant und Ashby 1970; Forrester 1961]. Das Grundverhalten sozio-ökonomischer Regelkreissysteme fußt dabei auf dem Prinzip physikalischer Systeme. Neben der Theorie dynamischer Systeme umfaßt die Systemtheorie noch die Theorie statischer Systeme. Infolge der in Abschnitt 4.1 aufgezeigten Anforderungen soll das zu erstellende Modell die Dynamik des genannten Problems geeignet berücksichtigen, sodaß statische Systeme im folgenden nicht weiter berücksichtigt werden [Baetge 1974, Kopfer und Bierwirth 2003, S. 5].

Die Verwendung kybernetischer Methoden in betriebswirtschaftlichen und managementorientierten Fachrichtungen gründet sich in der Erkenntnis, daß unternehmerisches Entscheiden in dynamisch komplexen Systemen stets rückgekoppelt ist [Sterman 2000, S. 13ff.; Schwaninger 1996; Forrester 1961]. Ein Beispiel hierfür ist der in der Abbildung 4-2 verdeutlichte Regelkreis zur Planung und Steuerung industrieller Produktionsprozesse.

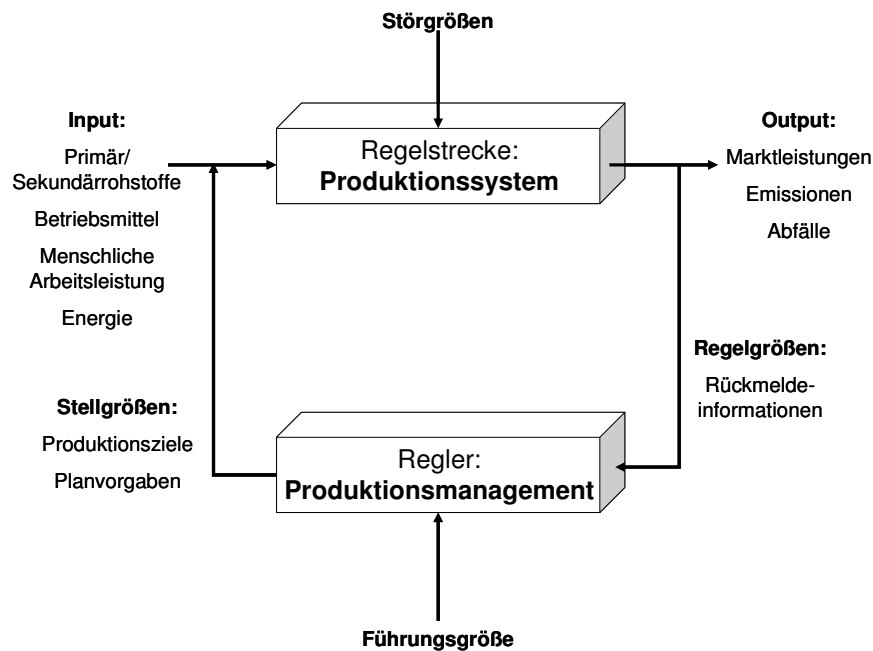


Abbildung 4-2: Regelkreis zur Planung und Steuerung industrieller Produktionsprozesse [Spengler 1998; Zäpfel 2000]

Der unternehmerische oder politische Planer trifft – angeleitet durch eine Führungsgröße wie zum Beispiel gewünschter Gewinn – eine Entscheidung, wie die das System beeinflussenden Stellgrößen aufeinander abzustimmen sind. Dies äußert sich etwa in der Festlegung einer Produktionsmenge, welche innerhalb einer Periode hergestellt werden soll. Diese Vorgabe übergibt der Entscheidungsträger unter Nutzung der Produktionsfaktoren an die Regelstrecke in Form des Produktionssystems. Infolge fehlerhafter Annahmen hinsichtlich der Folgen der herbeigeführten Systemintervention, unzutreffender Abstraktionen des realen Problems oder exogener Störungen entstehen regelmäßig Abweichungen zwischen der Führungsgröße und der Regelgröße. Das Schließen des Regelkreises erfolgt durch die Berücksichtigung dieser Regelabweichung mittels einer Überwachung des Produktionssystems und Übermittlung dieser Information an den Entscheidungsträger. Dieser Prozeß entspricht der Rückkopplung.

Im Rahmen der systemkybernetischen Methoden werden vor allem die Kontrolltheorie sowie die Simulationstechnik, insbesondere auf Grundlage von System Dynamics, eingesetzt.

System Dynamics ist eine in den späten 50er Jahre von Jay W. Forrester an der ‚Sloan School of Management des Massachusetts Institute of Technology (MIT)‘ entwickelte computergestützte Methode zur Analyse, Modellierung und Simulation komplexer dynamischer Systeme. [Sherwood 2003, S. 305]. Forrester verbindet dabei Methoden aus der Regelungstheorie, der deskriptiven Entscheidungstheorie sowie der Simulationstechnik, um die Komplexität von realen Systemen zu erfassen, ihr langfristiges Verhalten zu analysieren und letztlich systemisches Denken zu unterstützen [Forrester 1971a, S. 1ff.].¹⁰⁹ Mit System Dynamics ist es auf

¹⁰⁹ Forrester hat den ersten Artikel über die Methode ‚System Dynamics‘ 1958 veröffentlicht [Forrester 1958]. Zu der Verbreitung von System Dynamics in Wissenschaft und Praxis wird unter anderem auf die folgende Literatur verwiesen [Ossimitz 2003; Coyle 1998].

diese Weise möglich, nichtlineare Abhängigkeiten und Verzögerungseffekte in Rückkopplungsstrukturen abzubilden und mit Hilfe der kontinuierlichen Simulation zu lösen.

Die Literatur ordnet die Methode systemdynamischer Simulation unter anderem den quantitativen Analyseinstrumenten zu. Die Wirkungsbeziehungen zwischen den einzelnen Variablen werden jedoch nicht nur auf Grundlage von quantitativen Zeitreihen (Vergangenheitsdaten), sondern auch durch qualitative Methoden wie Expertenaussagen gewonnen. Infolge der Modellierung der Systemstruktur anhand qualitativer Aussagen wird System Dynamics daher auch als Methode der Futurologie den qualitativen Analyseinstrumenten zugeordnet [Milling 2002, S. 14; Bossel 1992, S. 29f.; Kirkwood 1998, S. 3; Barth 1974, S. 215ff.]¹¹⁰. Die Methode findet bislang vorwiegend im angloamerikanischen Raum praktische Anwendung; in Deutschland oder Japan beispielsweise ist System Dynamics in der unternehmerischen oder politischen Planung noch relativ unbekannt.

4.3 Auswahl eines geeigneten Analyseinstruments

Nachdem die Anforderungen an die Methode aufgezeigt und alle relevanten Analyseinstrumente erläutert wurden, kann nun ein geeignetes Verfahren ausgewählt werden. Die Auswahl der am besten geeigneten Methode wird nach dem Ausschlußprinzip durchgeführt.

Als erstes Kriterium kann die Betrachtung von Gesamtsystemen herangezogen werden. Dies führt zum Ausschluß aller univariaten Verfahren, wie der Trendextrapolation, der Zeitreihenprojektion und den rein qualitativen Verfahren. Damit entfallen die typischen Entwicklungsprognosen und die qualitativen Wirkungsprognosen des Marketing. Der Blick richtet sich vielmehr auf systemanalytische Verfahren. Nach Frerichs und Kübler eignen sich nach Ausschluß der intuitiven Methoden noch die ökonometrischen Verfahren, die Input-/Output-Modelle und der System Dynamics-Ansatz für die Modellierung komplexer dynamischer Systemzusammenhänge [Frerichs und Kübler 1980, S. 6]. Alle drei Verfahren erfüllen die Anforderungen bezüglich der Mehrstufigkeit und Multivariabilität sowie der Notwendigkeit, nichtlineare Entwicklungen zu integrieren. System Dynamics steht dabei als relativ junge ökonomische Disziplin von Beginn an in Konkurrenz zu den klassischen Verfahren der ökonometrischen Systemmodellierung.

Im Hinblick auf den Zeitraum eignen sich ökonometrische Verfahren und Input-/Output-Methoden eher für kurz- bis mittelfristige Prognosen. System Dynamics hingegen ist auf langfristige Vorhersagen mit stabilen und instabilen Entwicklungspfaden ausgerichtet, um so zum Beispiel Parameterintervalle für eine dauerhaft tragfähige Entwicklung angeben zu können. Die Struktur des Modells ist dabei insofern nicht als konstant vorausgesetzt, als sich die Intensitäten und Vorzeichen der Wechselbeziehungen ändern können [Kuchenbecker 1999, S. 19, 69]. Zur Verlängerung der verfügbaren Reaktionszeit müssen potentielle Ereignisse mög-

¹¹⁰ Zur Anwendung des sogenannten ‚Agent-Based Modelling‘ als Alternative zu System Dynamics wird auf die folgende Literatur verwiesen [Stermann 2000, S. 896].

lichst frühzeitig erkannt werden. Gerade in Branchen wie der Automobilindustrie haben Unternehmen aufgrund des dynamischen Marktes und der Vielzahl von Einflüssen mit großen externen Unsicherheitsfaktoren zu kämpfen. Im Rahmen des Szenariomanagement bietet sich daher ein langfristiges Analyseverfahren wie System Dynamics an.

Ein entscheidender Aspekt bei der Auswahl der Methode ist zudem die benötigte Datenbasis. Die explizite Forderung nach der Einbeziehung qualitativer („weicher“) Daten zur Untersuchung sozioökonomischer Zusammenhänge sowie teilweise fehlende Zeitreihen von Variablen aufgrund der Neuartigkeit des Prognoseproblems sprechen für die Anwendung von System Dynamics. System Dynamics Modelle reagieren auf die meisten exogenen Parameter eher insensitiv; geringe Schätzfehler bei den Parametern führen deshalb in der Regel nicht zur Änderungen im Systemverhalten [Kuchenbecker 1999, S. 69]. Der Schwerpunkt der Ökonometrie und der Input-/Output-Modelle liegt im Bereich empirischer Analysen. Die Modellierung basiert dabei vor allem auf regressionsanalytischen Untersuchungen, die mit einem hohen Datenbedarf verbunden sind. Wegen der Forderung nach einer systematisch orientierten, modellhaften Erfassung komplexer Zusammenhänge ist System Dynamics eine geeignete Methode der Komplexitätserfassung. Zudem sind systemdynamische Ansätze weitgehend unproblematisch in andere Methoden zu integrieren [Liebert 2001, S. 21ff.; Milling und Maier 1996, S. 47].

Befürworter rein prognoseorientierter statistischer Methoden werfen „System Dynamics“ indes gerade die unzureichende (qualitative) Datengrundlage vor. Sie kritisieren die Methode unter dem Blickwinkel der Validierbarkeit. Die Bestimmung der Parameter und der Prozeß der Modellbildung wird infolge der geringen Formalisierung als relativ informell und willkürlich, vom subjektiven Ziel des Modellierers abhängig, erachtet [Kuchenbecker 1999, S. 69]. Hierzu tragen insbesondere die interpretationsfähigen Expertenbefragungen bei, so daß die Methode – wie andere Simulationsmethoden – nur spezielle und keine allgemeingültigen Lösungen liefert. Die Bewertung von Systemen zur Unterstützung von Entscheidungen muß gleichwohl folgendes berücksichtigen: Das Modell kann als sinnvoll bezeichnet werden, wenn es in der Lage ist, die ihm gestellten – fallspezifischen – Anforderungen zu erfüllen und das reale Problem abzubilden, wobei der Beurteilung der Validität keine Entscheidung über „richtig“ oder „falsch“ zugrunde liegt [Forrester 1961, S. 115]. Nach Barlas, Milling und Meadows folgen Validitätstests vielmehr einem iterativen Prozeß. Die Phasen der Validierung sind [Barlas 1996, S. 189, Milling 1974, S. 208f., 215ff.; Meadows 1980, S. 36ff.]:

- die Strukturvalidierung
- die Parametervalidierung und
- die Verhaltensvalidierung.

Validitätstests zielen zum einen auf die Modellstruktur oder auf das Modellverhalten ab. Zum anderen können die Validitätstests empirisch oder theoretisch begründet werden [Barlas 1996, S: 189].¹¹¹

Die Strukturkonformität vergleicht die einzelnen Modellbeziehungen mit den Zusammenhängen in der Realität oder mit theoretischem Expertenwissen, wobei Plausibilitätstests mit Einbindung von Sachverständigen eine wichtige Rolle spielen [Forrester 1961, S. 117]. Die Parameterkonformität umfaßt die Überprüfung der numerischen Werte, die in das Modell einfließen. Alle Anfangswerte, Konstanten und Tabellenfunktionen sind auf ihre Realitätskonformität hin zu untersuchen und soweit möglich empirisch abzusichern.

Sensitivitätsanalysen zeigen auf, welche Einflußgrößen eine wesentliche Wirkung auf das Systemverhalten haben und deshalb näher untersucht werden sollten. Hierbei sind zunächst Wahrscheinlichkeitsverteilungen für unsichere Parameter auszuwählen. Mit einer ausreichenden Anzahl an Simulationsläufen sind diese Wahrscheinlichkeitsverteilungen anhand der Outputgrößen zu ermitteln. Diese Vorgehensweise ermöglicht dem Entscheidungsträger die Auswahl, welche Einflußgröße eine signifikante Wirkung auf das System hat [Sterman 2000, S. 854; Schneeweiß 1992]. Die Robustheit kann durch Stabilitäts- und Flexibilitätsuntersuchungen erfolgen. System Dynamics ist dabei in der Lage, die langfristigen Konsequenzen und die Entwicklung alternativer Strategien zur Systemverbesserung bei unterschiedlichen Umweltentwicklungen zu untersuchen und zu bewerten [Larsen und Bunn 1999]. Die Ergebnisse dieser Analysen sind indes nicht als Prognosen mit punktgenauen Ergebnissen im eigentlichen Sinne zu verstehen. Es sind mögliche Entwicklungspfade des Systems, die lediglich wahr werden, wenn die Annahmen der Simulation mit der Realität übereinstimmen [Morecroft 1999; Kuchenbecker 1999, S. 69]. Bei direkten Extremwerttests wird die Validität der Modellgleichungen unter ‚extremen‘ Bedingungen getestet. Hierbei wird abgeschätzt, welchen Wertebereichsgrenzen sich die einzelnen Variablen unter Extrembedingungen (asymptotisch) annähern. Die Bedingungen für solche Extremwerte sind in der Realität selten. Der Test ist demnach als eher theoretisch einzuordnen [Barlas 1996, S: 189].

Rein empirische Verhaltenstests überprüfen das Modellverhalten anhand des Realsystems. Sie sind jedoch lediglich unter der Voraussetzung stetigen Verhaltens sinnvoll. Bei transistentem Verhalten erfolgen theoretische Verhaltenstests, welche typische Verhaltensmerkmale des Systems (z.B. Steigungen) rein theoretischen Erkenntnissen gegenüberstellen. Die Strukturvalidität müßte – genaugenommen – die Überprüfung der Verhaltensvalidität überflüssig machen. Die strukturelle Validierung von Modellen ist jedoch relativ schwierig. Im Sinne der Effizienz bei der Modellierung sind daher *strukturorientierte Verhaltenstests* geeigneter. Bei reinen Verhaltenstests gilt ein Modell als valide, solange dessen Output-Verhalten empirische

¹¹¹ Bei der empirischen Validität erfolgt ein direkter Vergleich des Modells mit dem realen System, wohingegen die theoretische Validität das Modell hinsichtlich seiner Kompatibilität mit allgemeinem Wissen über die Realität, etwa aus Literatur- oder Expertenwissen, überprüft wird [Barlas 1996, S: 189].

oder theoretische Gültigkeit aufweist. Herkömmliche Verfahren des Operations Research sind für die vorliegende Fragestellung daher nicht so gut geeignet.

Gegenüber diesen Modellen mit Korrelation („Black Box“) spielt bei System Dynamics Modellen die Validität der internen Struktur des Modells eine wichtigere Rolle als das Output-Verhalten. System Dynamics Modelle versuchen, das Systemverhalten nicht lediglich zu reproduzieren, sondern vor allem zu erklären und damit Lernprozesse in Gang zu setzen [Barlas 1996, S. 185f.]. System Dynamics ermöglicht es auf diese Weise, den an der Entscheidungsfindung beteiligten Personen mit Hilfe einfacher Kausal- und Bestands- und Flußdiagramme einen begründeten Einblick in die Modellstruktur zu geben, Interdependenzen zwischen den Variablen zu erkennen und daraus Handlungsmaßnahmen für das (komplexe) Realsystem abzuleiten [Forrester 1971a, S. 13f.; Forrester 1972b, S. 29].

Im Gegensatz zu den auf der normativen Entscheidungstheorie¹¹² basierenden Verfahren des Operations Research, bezieht sich System Dynamics auf die *deskriptive Entscheidungstheorie*, welche das tatsächliche Entscheidungsverhalten von Menschen in den Vordergrund stellt.¹¹³ Eine besondere Bedeutung hat im System Dynamics Ansatz daher das Konzept der mentalen Modelle. In seinen Arbeiten zur Kognitionspsychologie stellt Philip N. Johnson-Laird mit den ‚Mentalen Modellen‘ ein neues Konzept zur Erklärung der Wirklichkeitswahrnehmung, der Problemlösung und der Informationsverarbeitung im Gehirn auf. So ist ein mentales Modell – vereinfacht – das Abbild der Wirklichkeit in der menschlichen Wahrnehmung, welches sich durch Lernprozesse und Erfahrungen bildet und verändert [Johnson-Laird 1983; Senge 1996, S. 313ff.; Doyle und Ford 1998].

Die Vorteile der im Unterbewußtsein vorhandenen mentalen Modelle liegen in der Flexibilität der Informationsaufnahme. Nachteil ist die mangelnde Kommunikationswirkung mentaler Modelle. So sind mentale Modelle zwangsläufig Annahmen, die vor allem auf subjektiven Beobachtungen und Erfahrungen beruhen, so daß eine interpersonelle Übermittlung von Wissen oder eine Überprüfung von Modellannahmen schwer möglich ist. Zudem sind viele mentale Modelle ereignisorientiert und damit häufig unpräzise. Probleme bereiten den Menschen dabei vor allem die obengenannten Rückkopplungsstrukturen, Zeitverzögerungen, Akkumulationen und Nichtlinearitäten [Dörner 2001; Sterman 2000, S. 28; Forrester 1971a, S. 13ff.]. In der Folge führt dies zu Fehleinschätzungen der Entscheidungsträger hinsichtlich der Wirkungen von Systemeingriffen, was wiederum zu Verschlechterungen des Systemverhaltens führt („policy resistance“). Um diesen Problemen entgegenzusteuern, beruht System Dynamics auf

¹¹² Der normative Ansatz geht von einem rational handelnden Menschen (Homo Oeconomicus) aus [Nitzsch 2002, Sterman 1991].

¹¹³ Unternehmerische oder politische Planer treffen Entscheidungen nicht auf Grundlage von rationalen Erwägungen, zur Verfügung stehender Handlungsalternativen oder über die voraussichtlichen Konsequenzen. Entscheidungen beruhen vielmehr auf der quasi ‚mechanistischen‘ Ausführung von Standardprozeduren, die sich aus Tradition und Gewohnheit entwickelt haben und sich nur sehr langsam an veränderte Rahmenbedingungen anpassen [Simon 1976; March und Simon 1994].

der Erstellung formaler Systemmodelle und deren Lösung mit Hilfe der kontinuierlichen *Simulation*.¹¹⁴

Der System Dynamics Ansatz beschränkt sich indes nicht auf die Untersuchung von Problemen in der zeitlichen Entwicklung. Vielmehr wird die Problemanalyse dazu genutzt, um Ansatzpunkte für Veränderungen von Entscheidungsregeln oder einer Modifizierung der Menge von Systemelementen zu testen und daraus Handlungsempfehlungen abzuleiten. Dieser Prozeß der Umgestaltung der Systemstruktur wird in der englischsprachigen Literatur als ‚policy design‘ bezeichnet [Sterman 2000, S. 103f.]. Diese Modelle können als ‚Laborversuche‘ oder ‚Managementsimulatoren‘¹¹⁵ zwar nicht jeden Mißgriff verhindern, aber sie decken doch die meisten Schwachstellen auf, so daß Fehler behoben werden können, bevor irreparable Folgen eingetreten sind. Weniger das Hervorbringen einer konkreten Lösung, als vielmehr die Generierung eines Systemverständnisses ist das Ziel des Ansatzes. System Dynamics erhebt daher für sich den Anspruch einer handlungsorientierten Systemtheorie [Milling 2002, S. 14].

Die Vorgehensweise bei der Modellierung der Systemstruktur teilt Forrester in einen iterativen Modellierungsprozeß mit sechs Phasen ein (Abbildung 4-3):

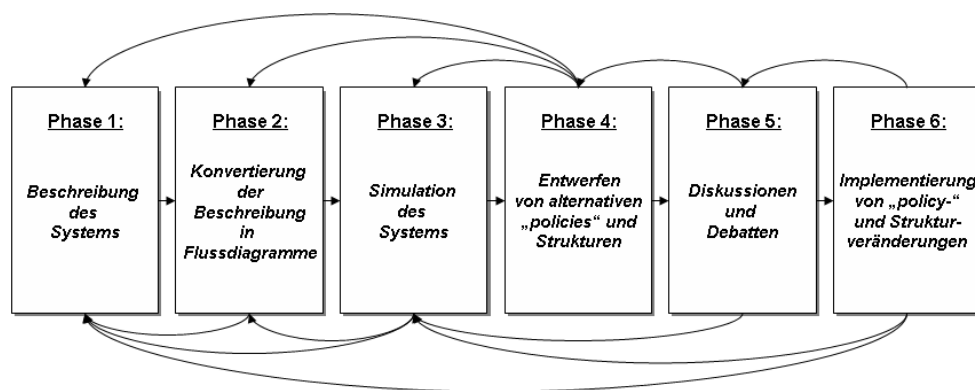


Abbildung 4-3: System Dynamics Modellierungsphasen [Eigene Darstellung nach Forrester 1994, S. 245ff.]

Zunächst ist zu fragen, aus welchen Elementen ein spezifisches System besteht und wie diese Elemente innerhalb des Systems miteinander agieren. Mit Hilfe von Kausaldiagrammen werden die Systemelemente miteinander verknüpft und in Phase zwei gemäß der Systembeschreibung in Bestands- und Flußdiagramme konvertiert.¹¹⁶ Diese Diagramme verbinden die einzelnen Elemente des Systems entsprechend der ermittelten Entscheidungsregeln (‚policies‘). In Phase drei wird das Modell simuliert. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse über die Wirkungen der einzelnen Stellhebel führen in Phase vier zum Testen des Systemverhaltens anhand alternativer Entscheidungen. Die Ergebnisse der unterschiedlichen Simulati-

¹¹⁴ Inzwischen gibt es eine Reihe alternativer Modellierungsprogramme. Zu den am häufigsten angewendeten Programmen gehören Vensim, Stella, PowerSim, iThink oder ModelMaker, die sich hinsichtlich der Anwendung indes sehr ähneln siehe [Ford 1999]. In der weiteren Darstellung des System Dynamics Ansatzes wird auf Vensim zurückgegriffen.

¹¹⁵ Management Flight Simulators [Sterman 2000, S. 4]

¹¹⁶ Kausal- sowie Bestands- und Flußdiagramme werden in Kapitel 5 näher erläutert.

onsläufe sollen Anlaß für Diskussionen sein, welche Entscheidungen letztlich getroffen werden und wie die Struktur eventuell anzupassen ist [Forrester 1994, S. 245ff.; Bunz 1988, S. 75].

Ein Vergleich der Methoden der Kontrolltheorie sowie des System Dynamics Ansatzes zeigt, daß es insbesondere mit dem letzteren Ansatz möglich ist, eine Vielzahl der unter Abschnitt 4.1 aufgezeigten Anforderungen zu berücksichtigen. Im folgenden wird daher nur System Dynamics als Methode der kausalen Systemstrukturbeschreibung weiter untersucht.

Entscheidungsträger stehen bei Marktrestrukturierungen, welche sich etwa durch neue Umweltgesetzgebungen im Automobilbereich ergeben, vor der Herausforderung, Systeme neu gestalten zu müssen. Dabei können die Handelnden meist nicht auf Zeitreihen oder eigene Erfahrungen über früheres Systemverhalten zurückgreifen. Gleichwohl sind zur Beurteilung von Chancen und Risiken des Markthandelns Kenntnisse über mögliche Zukunftsverläufe erforderlich. Die Szenariotechnik (siehe Abschnitt 4.3.1) kann dabei helfen, ein breites Spektrum von Entwicklungspfaden aufzuzeigen. System Dynamics kann mit Hilfe der Abbildung von geplanten und erwarteten Material-, Informations- und Finanzströmen dazu beitragen, den aufgezeigten Informationsmangel durch Einblick in das Systemverhalten und entsprechende Simulationsstudien auszugleichen [Stermann 2000, S. 28ff.].

Zahlreiche Disziplinen – sowohl der Naturwissenschaften (z.B. Physik, Chemie, Biologie), als auch der Humanwissenschaften (z.B. Soziologie, Pädagogik, Psychologie) – bedienen sich heute des Systemdenkens und systemtheoretischer Konzepte [Schwaninger 1996; Berg und Kuhlmann 1992]. Im Rahmen der Gesetzesfolgenabschätzung existieren bereits Modelle zur Bewertung politischer Instrumente im Individualverkehr [Christidis et al. 2003].

Vor dem Hintergrund der vorgestellten Methoden und der genannten Vorteile, soll im folgenden ‚System Dynamics‘ als die – für die Entscheidungsunterstützung im Individualverkehr – am besten geeignete Methode herangezogen werden. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird deshalb ein strategisches Instrument zur Entscheidungsunterstützung auf der Grundlage von System Dynamics entwickelt. Um dabei das Kaufverhalten des Individuums zu verstehen und in geeigneter Weise zu simulieren, ist es notwendig, ein geeignetes Verfahren zur Analyse der Kaufentscheidung auszuwählen, welches die vorliegende Planungssituation im Individualverkehr adäquat berücksichtigt.

4.4 Ansätze zur Analyse der Kaufentscheidung

Der folgende Abschnitt untersucht die Ausgangspunkte für das Konsumentenverhalten nach ihrer Eignung zur Abbildung der PKW-Nachfrage. Zuerst wird der individuelle Entscheidungsprozeß aufgezeigt, dann werden die mikroökonomischen Beweggründe des Konsumentenverhaltens erläutert. Daran anschließend behandelt das Kapitel probabilistische Nachfragemodelle und die Theorie diskreter Auswahlentscheidungen (Discrete Choice Theory).

4.4.1 Mikroökonomische Ansätze des Konsumentenverhaltens

Marktdurchdringungsmodelle beschäftigen sich auf der Makroebene mit der Adoption und Diffusion neuer Produkte oder neuer Techniken. Als Adoption wird die Kauf- oder Übernahmeentscheidung potentieller Kunden („Adopter“) bezeichnet. Die Diffusion ergibt sich dabei aus der zeitlich kumulierten Menge der Adoptionen [Felten 2001, S. 6ff.]. Ein Beispiel für diese Verläufe ist der Diffusionsprozeß von Internetzugängen, bei dem durch Netzeffekte ein exponentielles Wachstum bis zu einer gewissen Sättigungsgrenze stattfindet [Dutta und Roy 2004, S. 159; Brockhoff 1992, S. 134].

Der *individuelle Entscheidungsprozeß* durchläuft nach Ben-Akiva verschiedene Phasen. Nachdem der Konsument das Entscheidungsproblem definiert und (Produkt-)Alternativen entwickelt hat, bewertet er die Alternativen und wählt auf Basis dieser Bewertung eine Alternative aus [Ben-Akiva und Lerman 1985, S. 31ff.].¹¹⁷ Die Elemente dieses Prozesses sind die Entscheidungsträger als Aggregation der am Markt handelnden Konsumenten, die Auswahlalternativen, meßbare Attribute der (Produkt-)Alternativen und eine Entscheidungsregel. Hinsichtlich der berücksichtigten Elemente, insbesondere der Entscheidungsregel, bestehen große Spielräume. Die Anwendung des Nutzenprinzips setzt dabei voraus, daß sich die Attributwerte einer Alternative auf einen einzigen Skalenwert zurückführen lassen, der zu den Attributwerten in einem funktionalen Verhältnis steht. Der Funktionswert kennzeichnet die Attraktivität oder den „Nutzen“ der Attribute einer gegebenen Alternative. Die Nutzenfunktion berücksichtigt dabei, daß der Entscheidungsträger alle Attribute miteinander vergleicht und ein besonders positives Attribut durch ein negatives Attribut ausgleichen kann [Eggert 2003, S. 32f.].

Es finden sich zahlreiche Ansätze zur Kategorisierung solcher Entscheidungsprozesse. Corstjens und Gautschi untergliedern die Vielzahl der vorliegenden Modelle zunächst in Ansätze der Mikroökonomie und der mathematischen Psychologie [Corstens und Gautschi 1983, S. 20; Herrmann 1992, S. 79f.]. Die Nachfrage eines nutzenmaximierenden und rational handelnden Haushaltes hängt in der *mikroökonomischen Haushaltstheorie* von den Güterpreisen und dem verfügbaren Einkommen, den Bedürfnissen und Wünschen sowie den rechtlichen und institutionellen Bestimmungen ab. Fraglich ist mithin, welcher Budgetbeschränkung der Konsument aufgrund seines Einkommens und der Güterpreise unterliegt und wie hierdurch seine Konsummöglichkeiten begrenzt sind. Desweiteren sind die Präferenzordnung und die Nutzenfunktion zu betrachten, um die Bedürfnisse und Wünsche des Haushaltes zu beschreiben. Daraus leitet sich in einem dritten Schritt der optimale Konsumplan (Güterbündel) ab, also die Kaufentscheidung, die der Konsument angesichts seiner Konsummöglichkeiten und seiner Präferenzen für die Bestmögliche hält. Jeder Haushalt hat eine (individuelle) Präferenzordnung \succeq über dem Konsumraum \mathbb{R}_+^n .¹¹⁸, die neben Güterpreisen und Einkommen für

¹¹⁷ Daneben treffen Konsumenten Entscheidungen auch intuitiv und nachahmend.

¹¹⁸ Anm.: Die Gesamtmenge der Güterbündel, die der Konsument in Betracht zieht [Herberg 1989, S. 63]

die Kaufentscheidung maßgeblich ist: $X^1 \succeq X^2$ bedeutet, daß der Haushalt das Güterbündel X^1 für mindestens ebenso gut hält wie das Güterbündel X^2 . $X^1 \succ X^2$ bezeichnet eine Präferenz von Güterbündel X^1 [Herberg 1989, S. 56ff.; Ben-Akiva und Lerman 1985, S. 39ff.].¹¹⁹ Indifferenzkurven beschreiben Präferenzen anschaulich und bilden die unendliche Menge von Güterbündeln mit gleicher Präferenz ab (siehe Abb. 4-4).

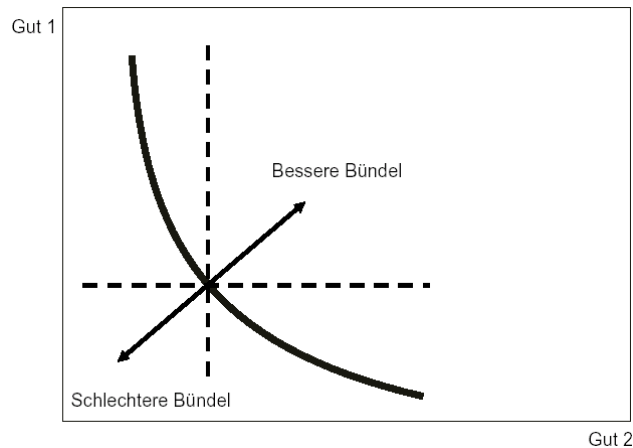


Abbildung 4-4: Indifferenzkurve bei Konvexität und Monotonie der Präferenzen [Eigene Darstellung nach Varian 2001, S. 36ff., 43]

Das neoklassische Nachfragemodell nimmt die vollkommene Information des Konsumenten sowie die Homogenität der Güter und deren beliebige Teilbarkeit an und eignet sich somit nur unter Vorbehalt für nachfrageorientierte Anwendungen wie die quantitative Analyse der PKW-Nachfrage. Substitution zwischen Produkten erlaubt der mikroökonomische Ansatz nicht. Vielmehr ist diese Theorie Grundlage weiterer Konsumtheorien, deren Entwicklung sich (auch) aus den restriktiven Annahmen der Haushaltstheorie entwickelte [Eggert 2003, S. 38f.].

Das *Modell von Lancaster* ermöglicht eine realistischere Erklärung der Güternachfrage und ist für die Zwecke des Marketings von hoher Bedeutung. Hierbei hängt die Nachfrage nicht vom Gut in seiner Gesamtheit (Homogenität), sondern von bestimmten, für den Konsumenten wichtigen Eigenschaften $z = (z_1, \dots, z_J)$ ab. So betrachtet ein Konsument einen PKW als ein Gut aus objektiv feststellbaren Kennzahlen, zum Beispiel Leistung, Kraftstoffverbrauch oder

¹¹⁹ Die Präferenzordnung hat die folgenden Eigenschaften: Sie ist *vollständig*, wenn der Konsument in der Lage ist, zwei beliebige Güterbündel miteinander zu vergleichen und relativ zueinander zu bewerten. Für beliebige $X^1, X^2 \in R^n_+$ gilt $X^1 \succ X^2$ oder $X^2 \succ X^1$ oder beides. Die Präferenzordnung ist *transitiv*, wenn der Konsument konsistente Entscheidungen trifft. Das heißt, daß wenn der Haushalt X^1 für ebenso gut wie X^2 und X^2 für mindestens so gut wie X^3 hält, so muß er auch X^1 als mindestens ebenso gut wie X^3 halten. Die Präferenzordnung ist *reflexiv*, wenn für jedes $X \in R^n_+$ gilt $X \succeq X$ [Herberg 1989, S. 69f.; Laux 1998, S. 69ff.; Bamberg und Coenenberg 2002, S. 35f.].

Umweltverträglichkeit; einige der Eigenschaften interessieren den Käufer nicht, während andere Grundlage seiner Kaufentscheidung sind [Herrmann 1992, S. 91ff.; Triplett 1973, S. 78].

Zur Verdeutlichung sind in Abbildung 4-5 die Güter 1 und 2 abgebildet, die für einen Haushalt die beiden in einem festen Verhältnis stehenden Eigenschaften z_1 und z_2 aufweisen. Die Variablen x_1 und x_2 bilden dabei Kombinationen der betrachteten Eigenschaften ab. Die Budgetrestriktion beschränkt die Menge der Eigenschaftskombinationen, welche den Nutzen des Konsumenten maximieren, auf die Strecke EF. Welchen Punkt ein Haushalt auf der Budgetgerade wählt, hängt von der individuellen Präferenzstruktur und damit von der abgebildeten Indifferenzkurve ab (z.B. Punkt A).¹²⁰

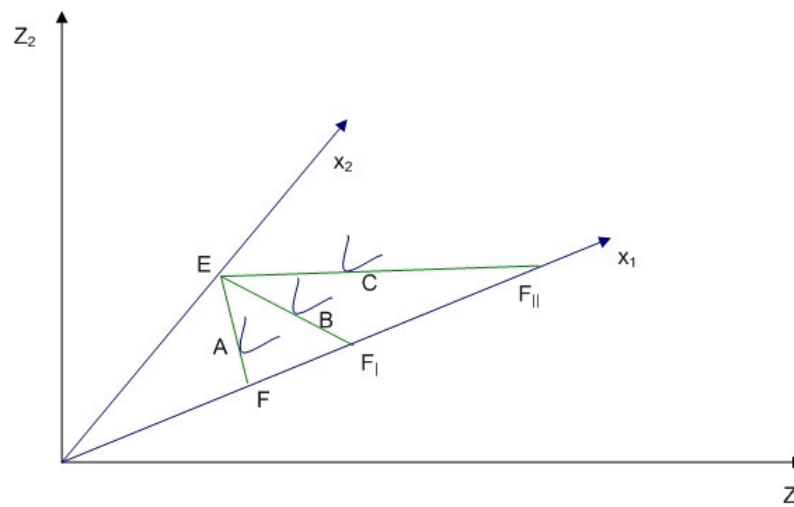


Abbildung 4-5: Auswirkungen von Maßnahmen der Produktpolitik und des Marketing im Eigenschaftsraum [Eigene Darstellung nach Herrmann 1992, S. 94]

Der Ansatz von Lancaster ermöglicht die differenzierte Abbildung von Produkten und erweitert damit die (neoklassische) Haushaltstheorie. Gleichwohl ist die Annahme, nach der die Konsumenten die Produkteigenschaften objektiv bewerten können, kritisch zu hinterfragen. Auch der von Lancaster unterstellte monoton steigende Verlauf des Nutzens (positiver Grenznutzen) widerspricht empirischen Erkenntnissen, das heißt ‚mehr‘ ist nicht in jedem Fall ‚besser‘. Zudem bezieht sich die Differenzierung nur auf die Produkte, nicht aber auf die Präferenzen der Haushalte. Die Kritik am neoklassischen Konsummodell mit der deterministischen und eindeutigen Präferenzordnung bleibt also gültig. Schließlich vernachlässigt der Ansatz von Lancaster dynamische Aspekte der Nachfrage [Herrmann 1992, S. 94f.; Eggert 2003, S. 41f.].

Die *Verhaltenswissenschaft* stellt die deterministische Natur menschlichen Entscheidungsverhaltens in Frage und beruft sich auf Beobachtungen, wonach Individuen – zum Teil – inkon-

¹²⁰ Eine Preissenkung für Gut 1 hat dabei zur Folge, daß sich die Budgetgerade EF in Richtung EF_I verschiebt. Die ‚neue‘ Merkmalswunschkombination liegt zum Beispiel in Punkt B. Die Produktvariation von Gut 1 in Bezug auf die Eigenschaft z_2 führt zu einer weiteren Drehung der Budgetgeraden (EF_{II}), womit sich auch die gewünschte Kombination der Eigenschaften verschiebt (Punkt C) [Herrmann 1992, S. 93f.; Triplett 1973, S. 78ff.].

sistent handeln und ihre Entscheidungen mit Unsicherheit behaftet sind. Mathematische Nachfragemodelle, die diese Reaktionen von Individuen auf sich ändernde Anreizsysteme erklären, lassen sich durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen in *voll- und teilstochastische Ansätze* unterscheiden [Herrmann 1992, S. 81ff.]. Alternativ bieten sich noch *Präferenz- oder Raummodelle* (z.B. Verfahren der mehrdimensionalen Skalierung) an [Eggert 2003, S. 42ff.; Herrmann 1992, S. 83, S. 96ff.].

Die folgende Betrachtung konzentriert sich auf *teilstochastische Modelle*, die zum einen die objektiven Eigenschaften eines Produktes messen und zum anderen die Unbestimmtheit in der individuellen Wahrnehmung der Attribute durch eine stochastische Komponente repräsentieren. Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal zu den mikroökonomischen Nachfragemodellen liegt in der Hypothese, daß die verfügbaren Güter in diskreten Einheiten konsumiert werden. Diese Annahme entspricht auch der Nachfragesituation auf vielen Konsumgütermärkten (z.B. PKW-Nachfrage) eher als die Vorstellung über den Konsum von Güterbündeln [Eggert 2003, S. 44, 53; Herrmann 1992, S. 116f.; Luce 1959, S. 9; Tversky 1972, S. 284ff.; Kaas 1980, S. 233; Thurstone 1927, S. 273ff., Thurstone 1945, S. 240ff.].

Die Automobilnachfrage in einer Volkswirtschaft kann zwar in Abhängigkeit vom Grad der Aggregation als stetig, also als Ergebnis der Entscheidung eines durchschnittlichen (repräsentativen) Konsumenten, betrachtet werden (z.B. Veränderung der Marktanteile bei Preisänderungen). Mit diesem Übergang auf ein höheres Aggregationsniveau ist gleichwohl ein Informationsverlust verbunden. Die Heterogenität der Entscheidungsträger und ihrer Entscheidungssituationen geht weitgehend verloren. Der folgende Abschnitt erläutert daher die Theorie diskreter Auswahlentscheidungen (Discrete Choice Theory) und damit auch die Logit-Modelle als wichtige Modelle mit stochastischem Nutzen [Eggert 2003, S. 51f.].

4.4.2 Die Theorie diskreter Auswahlentscheidungen

Die ‚Discrete Choice Theory‘ beruht auf teilstochastischen Nachfragemodellen. Die unterscheidbaren Alternativen werden aus einer *endlichen* Anzahl voneinander getrennter, *diskreter* Möglichkeiten gewählt. Die Alternativen sind abzählbar und bei jeder Entscheidung ist eine davon auszuwählen, das heißt es kann kein dauerhaftes Konsumgut (z.B. PKW) gekauft werden, welches zu zwei Dritteln aus der Marke A und zu einem Drittel aus der Marke B besteht. Entscheidungen, denen diese beliebigen Mischungsverhältnisse zugrunde liegen (2,5136kg Äpfel und 1,1442kg Birnen), sind stetige Entscheidungen und Gegenstand der unter 4.4.1 behandelten mikroökonomischen Haushaltstheorie [Maier und Weiss 1990, S. 1].

Mit einem Instrument, welches mit diskreten Alternativen umgehen kann, besteht keine Notwendigkeit zu aggregieren. Die Theorie diskreter Entscheidungen berücksichtigt die Heterogenität der Entscheidenden in der Analyse und vermeidet damit einen Informationsverlust. Bei der Betrachtung diskreter Entscheidungen können zwar auch Aussagen über Veränderungen aggregierter Größen gemacht werden. Der Unterschied zur Analyse stetiger Entscheidun-

gen liegt indes darin, daß die Theorie diskreter Entscheidungen und deren Instrumente erst die Ergebnisse und Prognosen zusammenfassen, während im vorhergehenden (stetigen) Fall die Aggregation eine notwendige Voraussetzung für die Analyse ist [Maier und Weiss 1990, S. 3].

Viele sozioökonomische Probleme sind das Ergebnis diskreter Entscheidungen. Insbesondere in der Verkehrsplanung und hierbei insbesondere bei der Verkehrsmittelwahl („model split“) kommen diskrete Entscheidungsmodelle zur Anwendung. Verkehrsmittelwahlmodelle untersuchen zum Beispiel, welche Faktoren die Attraktivität des öffentlichen Verkehrs gegenüber dem Individualverkehr bestimmen. Bei Anwendungen im Marketing ermitteln diskrete Entscheidungsmodelle verschiedene Einflußfaktoren auf das Kaufverhalten getrennt voneinander. Dies sind wichtige Informationen, um Marktchancen eines Produktes abzuschätzen [Maier und Weiss 1990, S. 4ff.].

Zu den Modellen der Theorie diskreter Auswahlentscheidungen (Discrete Choice Modelle) zählen die logistische Regression und die Gruppe der Logit-Modelle. Die logistische Regression stellt dabei ein Verfahren zur multivariaten Analyse binärer abhängiger Variablen dar, was bedeutet, daß die untersuchten Variablen nur zwei verschiedene Merkmalsausprägungen annehmen können. Eine Übertragung der logistischen Regression auf abhängige Variable mit mehr als zwei Merkmalen ist möglich und führt zu den Logit-Modellen [Maier und Weiss 1990, S. 131; Cramer 1991, S. 1ff]. Die im Folgenden zur Anwendung kommenden Logit-Modelle sind besonders zur Nachbildung diskreter Entscheidungen geeignet. Hierbei muß der Konsument anhand seiner Präferenzordnung (Nutzenfunktion) unter n vorgegebenen Varianten auswählen.

Die diskreten Alternativen der Kaufentscheidung unterscheiden sich durch die Nutzenfunktion U_i , welche in Anlehnung an die Haushaltstheorie von *Lancaster* als Funktion der Gütereigenschaften x_i sowie der Konsumentenattribute S beschrieben ist [Maier und Weiss 1990, S. 18, S. 98ff.]:

$$U_i = U(x_i, S) \quad (4.1)$$

Diejenige Alternative i mit dem höchsten Rang in der Präferenzordnung, gleichbedeutend mit dem größten Nutzen, wird ausgewählt. Die Theorie diskreter Entscheidungen basiert auf der Zufallsnutzentheorie [Lilien und Kotler 1983, S. 226]. Diese Theorie geht davon aus, daß die Auswahl zwar von Individuen getroffen wird, die Entscheidung an sich aber nicht in allen Einzelheiten beobachtet werden kann (keine vollständige Information). Die Zufallsnutzentheorie setzt voraus, daß die Verbraucher von deterministischen Entscheidungsregeln Gebrauch machen, der Modellanwender jedoch nur ungenaue Kenntnis dieser Regeln hat. Aus diesem Grunde muß die analysierende Person Unsicherheiten berücksichtigen, deren Ursache zum Beispiel in unbeobachteten Attributen der Alternativen, unbeachteten sozioökonomischen Charakteristika, Meßfehlern oder Fehlspezifikationen der Nutzenfunktion liegen [Anderson et

al. 2001, S. 33; Bierlaire 1997, Manski 1977, Kieckhäfer 2008, S.45]. In der allgemeinen Form der Discrete Choice Modelle wird der durch den Konsumenten wahrgenommene Zufallsnutzen N_i einer Alternative i daher durch die Addition der beobachtbaren (deterministischen) Komponente U und der nicht beobachtbaren, zufälligen (stochastischen) Komponente ε ausgedrückt. Eine Alternative a hat dann für ein Individuum i den Nutzen:

$$N_a^i = U_a^i + \varepsilon_a^i \quad (4.2)$$

Der politische Entscheidungsträger wählt hierbei die Alternative mit dem höchsten Nutzen aus. Der deterministische Teil des Nutzens ist eine Funktion der Attribute, welche die Alternativen beschreiben sowie der bezeichnenden Eigenschaften der Entscheidungsträger. Für diese Funktion wird in den meisten Fällen eine Linearität in den Parametern angenommen, [Ben-Akiva und Bierlaire 2003, S. 11; Bierlaire 1998, S. 217; Herrmann 1992, S. 136; Kieckhäfer 2008, S. 47]. Diese lineare Form des deterministischen Nutzens U in Abhängigkeit vom Wert, den Individuum i den Attributen x der betrachteten Alternative a beimißt, ist definiert als:

$$U_a^i = U_a^i(x_a^i) = \beta_1 x_a^i(1) + \beta_2 x_a^i(2) + \dots + \beta_n x_a^i(n) = \sum_{k=1}^n \beta_k x_a^i(k). \quad (4.3)$$

Die Parameter sind mit β_k bezeichnet. Die Annahme der Linearität in den Parametern ist nicht restriktiv; sie dient der Vereinfachung und Lösung des Discrete Choice Modells. Nicht-lineare Wirkungen lassen sich aber über eine geeignete Definition der Attribute berücksichtigen. Speziell im Hinblick auf die Anwendung des Modells auf den Automobilmarkt ist die Stärke des Einflusses verschiedener Attribute oft nichtlinear. So kann die Funktion hierbei auch nicht-linear über Box-Cox- oder Box-Turkey-Transformationen formuliert werden [Bierlaire 1998, S. 217, Maier und Weiss 1990, S. 126-127].

Verschiedene Annahmen über die Verteilung dieser Störterme haben im Laufe der Entwicklung zu drei wesentlichen Modellen geführt: Dem *Multinomial Logit*, dem *Multinomial Nested Logit* und dem *Multinomial Probit Modell*. Das am häufigsten angewendete multinomiale Entscheidungsmodell ist das Multinomial Logit (MNL). Mit Hilfe des MNL lassen sich auf Basis der aggregierten Auswahlentscheidungen die relevanten Parameter für ein Modell zur Analyse der Kaufentscheidung berechnen. Das Modell beruht auf der Annahme, daß die Störterme (*unabhängig identisch*) *gumbel-verteilt* sind.¹²¹ Die Gumbel-Verteilung ist definiert durch die Verteilungsfunktion

$$\text{Prob}(X \leq \varepsilon) = F(\varepsilon) = \exp[-e^{-\mu(\varepsilon-\eta)}], \quad \mu > 0 \quad (4.4)$$

Die Dichtefunktion ist folglich

$$f(\varepsilon) = \mu e^{-\mu(\varepsilon-\eta)} \exp[-e^{-\mu(\varepsilon-\eta)}], \quad \mu > 0 \quad (4.5)$$

¹²¹ Die Gumbel-Verteilung ist ein Spezialfall der Fisher-Trippet-Verteilung, auch bekannt als logarithmierte Weibull-Verteilung.

Die Gumbel-Verteilung hat zwei Parameter, einen Lageparameter η und einen Skalierungsparameter μ . Abbildung 4-7 zeigt die Dichtefunktion der Gumbel-Verteilung mit $\eta=0$ und $\mu=1$ [Maier und Weiss 1990, S. 73; Ben-Akiva und Lerman 1985, S: 100ff.].

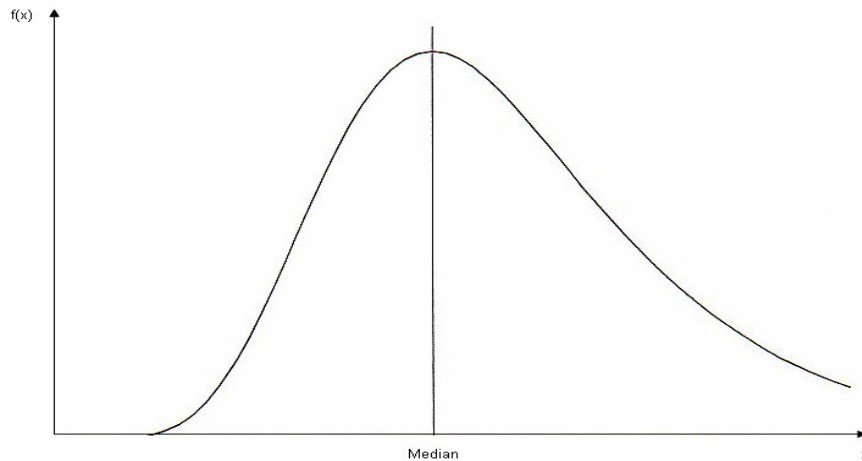


Abbildung 4-6: Die Dichtefunktion der Gumbel-Verteilung ($\eta=0$, $\mu=1$) [Maier und Weiss 1990, S. 73]

Die Dichtefunktion ist rechtsschief, da diese die Verteilung des Maximums von Zufallsvariablen abbildet: Schon *ein* hoher Zufallswert reicht für einen hohen Wert des Maximums aus.

Nach Ben-Akiva und Lerman hat die Gumbel-Verteilung die folgenden wichtigen Eigenschaften. Der Modus der Verteilung ist η . Der Erwartungswert ist $\eta + \gamma/\mu$, wobei γ die Eulersche Konstante darstellt.¹²² Die Varianz ist $\pi^2/6\mu^2$. Ist ε gumbelverteilt mit den Parametern (η, μ) , so ist $\alpha\varepsilon + V$, mit V und $\alpha > 0$ beliebigen Konstanten, wieder gumbelverteilt mit Parametern $(\alpha\eta + V, \mu/\alpha)$ [Ben-Akiva und Lerman 1985, S: 104f.].

Aus den Eigenschaften der Gumbelverteilung leitet sich das MNL-Modell ab. Sind ε_1 und ε_2 unabhängige gumbelverteilte Zufallsvariable mit Parametern (η_1, μ) und (η_2, μ) , so ist die Differenz $\varepsilon^* = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$ logistisch verteilt mit der folgenden Verteilungsfunktion:

$$f(\varepsilon^*) = \frac{1}{1 + \exp[\mu(\eta_1 - \eta_2 - \varepsilon^*)]} \quad (4.6)$$

Die Auswahlwahrscheinlichkeit P_j für eine bestimmte Alternative j ist durch die folgende Formel charakterisiert [Lilien und Kotler 1983, S: 227; Maier und Weiss 1990, S. 135f.]:

$$P_j = \frac{\exp[\mu V_j]}{\sum_{i=1}^n \exp[\mu V_i]} \quad (4.7)$$

Der Term μ stellt dabei einen positiven Skalierungsparameter der Verteilung der Störterme dar, der nicht identifizierbar ist. Er läßt sich willkürlich auf einen bestimmten Wert setzen [Ben-Akiva und Lerman 1985, S: 104ff.].

¹²² Die Eulersche Konstante repräsentiert einen Wert von 0,577.

Schließlich gilt es, die Gewichtungsfaktoren der Produkteigenschaften β zu ermitteln. Hierzu sind ökonometrische Schätzverfahren heranzuziehen, mit denen die Parameter der einzelnen Attribute zu errechnen sind. Das Logit-Modell aggregiert die einzelne Käuferentscheidung über eine Kundengruppe nimmt aus der Nachfragemenge einen Käufer heraus, der das Verhalten der Gruppe repräsentiert, die *Gewichtungsfaktoren* sind also *identisch* [Hermann 1992, S. 138f.].

Bei der Einführung neuer Produkte greifen Unternehmen oft auf die Ergebnisse konventioneller Marktforschung zurück, um zukünftige Kundenbedürfnisse zu ermitteln. In den meisten Fällen verlassen sich die Unternehmer auf Vergangenheitsdaten oder ganz einfach auf ihre Intuition. Insbesondere bei der Markteinführung von Innovationen liefern die Resultate oftmals nicht den gewünschten Erfolg und führen zu Fehleinschätzungen sowie falsch ausgerichteten Marketingaktionen. Die Discrete Choice-Modellierung ist ein effektives Instrument, um die Defizite auszugleichen. Das Verfahren, welches nicht nur von Marktforschern, sondern vor allem auch in der sozialen Verhaltensforschung eingesetzt wird, ermöglicht die angemessene Einschätzung der Nachfrage und Aussagen darüber, wie und warum Kunden bestimmte Entscheidungen treffen [Almquist et al. 2003, S. 22ff.]. Die Modelle der neoklassischen Konsumtheorie konzentrieren sich hingegen bei der Analyse diskreter Entscheidungen bislang zu stark auf die Abhängigkeit der Entscheidung von einzelnen Parametern. Discrete Choice-Modelle erlauben es, unterschiedliche Präferenzen beim Kaufentscheid zu analysieren, und so das Marktverhalten der Neuwagenkäufer zu prognostizieren. Interessant ist vor allem, wie Entscheidungen zwischen Alternativen zustande kommen, die von einer Vielzahl von Attributen abhängen [Maier und Weiss 1990, S. 25].

Bei der vorliegenden Problemstellung ist gerade durch die Anzahl der berücksichtigten Fahrzeugattribute, Marken und Antriebe eine große Zahl an Alternativen möglich. Mit dem speziellen Discrete Choice-Modell des Multinomial Logit erfolgt die Berechnung der nutzenmaximalen Alternative auch bei großer Anzahl der berücksichtigten Auswahlmöglichkeiten relativ problemlos [Börsch-Supan 1987, S. 29]. Dieser Vorteil beruht auf der Annahme unabhängig voneinander identisch Gumbel-verteilter Störterme, welche zu der Eigenschaft der Unabhängigkeit von irrelevanten Alternativen führt. Diese besagt, dass das Verhältnis der Auswahlwahrscheinlichkeiten zweier Alternativen unabhängig von den weiteren Alternativen im Choice Set ist. Diese als Restriktion zu wertende Eigenschaft kann jedoch über eine geeignete Auswahl der Alternativen und der Form des deterministischen Nutzens begrenzt werden. Hierzu ist vor allem die Auswahl nicht korrelierter Alternativen notwendig [Maier und Weiss 1990, S. 141ff., Train 2003 S. 46ff.]. Im vorliegenden Fall ist diese Voraussetzung die Differenzierung der Fahrzeuge auf Grund ihrer Antriebsart gewährleistet.

Im Allgemeinen führt die Wahl eines MNL-Modells zu der Modellierung und Analyse relativ einfacher Entscheidungssituationen. Hierbei trifft ein Entscheidungsträger – als Mitglieder einer bestimmten, homogenen Grundgesamtheit – eine Auswahl aus eindeutig voneinander

abgegrenzten Alternativen. Viele Entscheidungssituationen sind jedoch gerade nicht eindeutig. Im Gegenteil, die Käuferpräferenzen hinsichtlich der Produktattribute variieren, der Geschmack ist heterogen. Die Auswahlalternativen der einzelnen Konsumenten sind nicht immer eindeutig identifizierbar und auch der Entscheidungsprozeß selbst läßt sich nur bedingt nachvollziehen. Schließlich sind herkömmliche Discrete Choice Modelle nicht dazu geeignet, sequentielle Entscheidungen oder solche, die auf externen Effekten beruhen, geeignetet abzubilden und zu prognostizieren [Ben-Akiva et al. 1997, S. 274, Kieckhäfer 2008, S. 54].

4.5 Zusammenfassung

Quantitative Analysen erlauben Aussagen über das Maß der Abweichungen empirisch bestimmter Parameterwerte von festgelegten Zielwerten und ermöglichen Aufschluß über den dominanten Effekt im Falle konkurrierender Wechselwirkungen – etwa bei Fragen der gegenseitigen Beeinflussung von Technikeinsatz und Emissionen. Insbesondere in komplexen Fragen und in systemischen Rückkopplungsprozessen, die sich einer qualitativ argumentativen Abwägung entziehen, sind quantitative Modellierungen von besonderer Bedeutung. Forderungen nach quantitativen Verfahren in der Bewertung von Umweltregulierungen werden daher zunehmend erhoben, wegen fehlender Daten oder umstrittener quantifizierbarer Maße in sozioökonomischen Systemen aber selten eingelöst. Trotzdem findet sich das ‚Ideal‘ einer weitestgehenden Quantifizierung, etwa durch den Ansatz mit Hilfe der Systemtheorie qualitative Informationen quantitativ zu erfassen [Bullinger 1991].

Vor diesem Hintergrund ist daher die System Dynamics Methode nach dem Ausschlußverfahren aus den beschriebenen Prognoseverfahren ausgewählt worden. Die Verhaltenssimulation basiert hier auf kausalen Wirkungszusammenhängen zwischen den Variablen – wie umweltpolitischen Instrumenten und den für die Emissionen bestimmenden Größen.

Verfahren der verhaltensbeschreibenden Modellierung (wie beispielsweise die Trendprognose) versagen bei dynamischen Systemen, während strukturtreue, mit System Dynamics erstellte Simulationsmodelle relativ verlässliche Aussagen über mögliche langfristige Entwicklungen geben können. Ein strukturtreues Modell ergibt daher einen vollständigen Denkraum für eine umfassende Untersuchung, Bearbeitung, Diskussion, Bewertung, Entscheidungsvorbereitung und für die Simulation szenarioabhängiger Entwicklungspfade [Bossel 1992, S.14ff].

Damit erlaubt das Verfahren eine Förderung des Systemverständnisses. Für die Erstellung des Prognosemodells können dann sowohl quantitative als auch qualitative Daten eingesetzt werden. Aus Vergangenheitsdaten unvorhersehbare Verhaltensweisen des Systems können simuliert werden, daher können auch die Wirkungen bisher nicht eingesetzter Instrumente vorhergesagt werden. Eine Anpassung der Strategien während des Simulationsablaufes ist möglich. Dafür steht dem Benutzer eine Ein-/Ausgabeschnittstelle zur Verfügung, mit deren Hilfe wichtige Größen im Prognosemodell variiert werden können.

Durch die Simulation von Szenarien sind Aussagen über das zukünftige Verhalten des betrachteten Systems möglich. Verschiedene umweltpolitische Instrumente können kombiniert eingesetzt und die Auswirkungen auf die Zielgrößen im System können studiert werden.

5 Erstellung eines Simulationsmodells

Basierend auf den in Kapitel vier abgeleiteten Analyseinstrumenten und Modellierungsansätzen soll im folgenden ein Stoffstrom- und Finanzmodell zur strategischen Bewertung möglicher Politikalternativen im Individualverkehr entwickelt werden. Mit diesem Modell soll sowohl dem politisch als auch dem unternehmerisch Handelnden eine Planungsinstrument an die Hand gegeben werden, mit dem er seine Entscheidungen sicherer treffen und die Folgen daraus besser antizipieren kann. Hierfür sind zunächst die Anforderungen an eine geeignete Bewertungsmethodik zu konzipieren. Zur Entscheidungsunterstützung erfolgt im Rahmen der Bewertung von Politikalternativen ein Vergleich entscheidungsrelevanter Bezugsgrößen wie Emissionen oder fiskalische Einnahmen.

5.1 Elemente der Modellierung mit System Dynamics

Im Folgenden soll eine kurze Einführung in die Methodik systemdynamischer Simulation erfolgen.¹⁴⁸ Wie bereits in Abschnitt 4.4.4 erläutert, beruht die Modellierung mit ‚System Dynamics‘ auf der Annahme, nach der jeder Mensch Entscheidungen aufgrund eines subjektiven, unpräzisen, gedanklichen Modells (‚mental model‘) fällt. Dieses gedankliche Modell ist ein vereinfachtes Abbild der relevanten Größen und deren Beziehungen untereinander. Zur Lösung komplexer Probleme sind diese mentalen Modelle indes nicht ausreichend [Forrester 1971a, S. 13f.; Forrester 1972b, S. 29]. Die zur Erstellung gedanklicher Modelle verwendete Heuristik ignoriert Rückkopplungen, mehrfache Vernetzungen, Nichtlinearitäten und andere Elemente dynamischer Komplexität.

Mit Hilfe von Computermodellen lassen sich Wirkungsabschätzungen komplexer sozioökonomischer Systemen durchführen [Sterman 2000, S. 14, 28]. Nach Kirkwood bedeutet ‚System‘ eine Gesamtheit von Elementen, deren Zusammenwirken ein bestimmtes Verhaltensmuster hervorruft. Dieses Systemverhalten ist maßgeblich von der internen Systemstruktur und den Verknüpfungen der Systemvariablen untereinander abhängig [Kirkwood 1998, S. 2f.].

Bei System Dynamics stehen folgende Elemente für die Modellierung von Systemstrukturen zur Verfügung [Sterman 2000, S. 107]:

- Rückkopplungsschleifen (‚feedback loops‘)
- Bestands- und Flußgrößen (‚stocks and flows‘)
- Zeitverzögerungen (‚delays‘)
- Nichtlinearitäten (‚nonlinearities‘)

¹⁴⁸ Zur weiteren Vertiefung sei auf die System Dynamics Literatur von J.W. Forrester, J. C.W. Kirkwood und J.D. Sterman verwiesen [Forrester 1972a; Kirkwood 1998; Sterman 2000]. Weitere Informationen zu der im folgenden zum Einsatz kommenden Software VENSIM finden sich in den Handbüchern zum Softwarepaket [Vensim 2003].

Abbildung 5-1 stellt die Bestandsgrößen (Speicher) dar, die sich durch die Verknüpfung über Flußgrößen (Raten) im Zeitverlauf verändern. Die Flußgrößen, auch Flußraten genannt, enthalten Regeln („policies“), nach denen sich die Bestände innerhalb eines Systems zeitlich verändern. Bestandsgrößen akkumulieren also die Differenz aus dem Eingangsfluß und dem Ausgangsfluß eines Prozesses. Speicher werden in Anlehnung an Behälter durch Rechtecke dargestellt. Eingangsflüsse zeigen mit einem Doppelpfeil („Rohr“) in Richtung des Speichers, Ausgangsflüsse zeigen von der Bestandsgröße weg. Ventile kontrollieren hierbei die Flüsse. Quellen und Senken, dargestellt durch Wolken, haben eine unendliche Kapazität und ihren Ursprung außerhalb der Systemgrenze. Mathematisch ist der Zusammenhang zwischen Beständen und Flüssen durch Integration beschrieben [Kirkwood 1998, S. 16ff.; Sterman 2000, S. 192, 235].¹⁴⁹

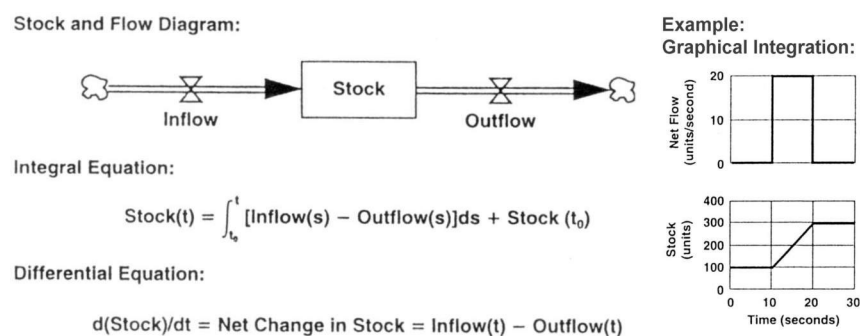


Abbildung 5-1: Bestands- und Flußgrößen mit gleichem Informationsgehalt und graphische Integration [Sterman 2000, S. 194, S. 235]

Die Analogie zu einem Speicher in der Regelungstechnik ist hier der Integrator (Verzögerungsglied) mit entsprechender Übertragungsfunktion aus Ein- und Ausgangsgröße. Dieser Integrator wird häufig als Flüssigkeitsbehälter („Badewanne“) mit Zulauf (Wasserhahn) und geregelter Ablauf (Pumpe oder Ventil) dargestellt. Hierbei können die Flußraten für den Zulauf und den Ablauf unterschiedlich sein [Sterman 2002, S. 508; Meadows 1980, S. 32].

Vergleichbar mit der Stellung eines Wasserhahns, bezieht sich die Modellierung dynamischer Prozesse auf die Funktionsweise eines Regelkreises, bei dem sich die Elemente gegenseitig beeinflussen und damit Rückkopplungen vorliegen (siehe Abbildung 5-2). Der „Entscheidungsträger“ überwacht die Lücke zwischen aktuellem und gewünschtem Wasserpegel. Wenn das Wasser den Pegel fast erreicht hat, dreht der Handelnde am Wasserhahn, damit sich der Wasserfluß verlangsamt. Die Variablen in diesem Wasserregulierungssystem sind in einer Ursache-Wirkungs-Beziehung angeordnet [Senge 1996, S. 96ff.].

¹⁴⁹ Die Flußrate nimmt in einer Periode einen konstanten Wert an, der Speicher wächst innerhalb derselben Zeit auf einen festen Wert an. Dieser feste Bestand bleibt (zunächst) auch bei Abfallen des Flusses erhalten [Sterman 2000, S. 235].

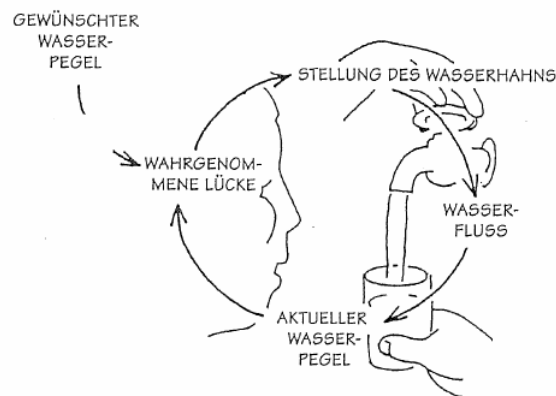


Abbildung 5-2: Die Regelung des Wasserhahns kontrolliert den Wasserfluß [Senge 1996, S. 96ff.]

Der Prozeß läuft kontinuierlich weiter, um den Wasserpegel auf den gewünschten Stand zu bringen. Je mehr Rückkopplungen in der Systemstruktur vorliegen, desto größer ist die innere Dynamik [Forrester 1972a, S. 23]. Das resultierende Verhaltensmuster hängt davon ab, ob es sich um eine positive („reinforcing loop“) oder eine negative Rückkopplung („balancing loop“) handelt (siehe Abbildung 5-3) [Forrester 1971a, S. 17f.; Forrester 1972b, S. 30]. Die Vorzeichen an den Pfeilen stehen für die Beziehung zwischen den Größen. Das positive Vorzeichen signalisiert eine gleichsinnige Beziehung (Bei Steigen/Sinken der unabhängigen Variablen steigt/sinkt auch die abhängige Variable), ein negatives Vorzeichen zeigt eine gegensinnige Beziehung (Bei Steigen/Sinken der unabhängigen Variablen sinkt/steigt die abhängige Variable) [Sterman 2000, S. 109].

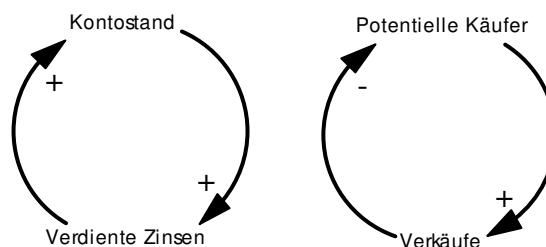


Abbildung 5-3: Beispiele für positive und negative Rückkopplungsschleifen [Eigene Darstellung nach Kirkwood 1998, S. 8ff.]

Eine Rückkopplungsschleife mit mehreren Elementen ist gegensinnig, wenn sich insgesamt eine ungerade Anzahl von Minuszeichen in einer Wirkungskette ergibt, eine gerade Anzahl verursacht eine gleichsinnige Gesamtwirkung [Bossel 1992, S. 56; Kirkwood 1998, S. 7, 102]. Die grundlegendsten Verhaltensmuster, die durch diese Rückkopplungsschleifen hervorgerufen werden, sind exponentielles Wachstum („exponential growth“), zielsuchende Prozesse („goal-seeking“) und Oszillation („oscillation“). Darüber hinaus gibt es, wie in Abbildung 5-4 dargestellt, noch weitere charakteristische Verhaltensmuster, die durch Nichtlinearitäten, Akkumulationen und Zeitverzögerungen innerhalb der Rückkopplungsstruktur entstehen. Dazu zählen das s-förmige (logistische) Wachstum („s-shaped growth“), kollabierendes („overshoot and collapse“) und überschwingendes Verhalten („growth with overshoot“) [Sterman 2000, S. 108ff.].

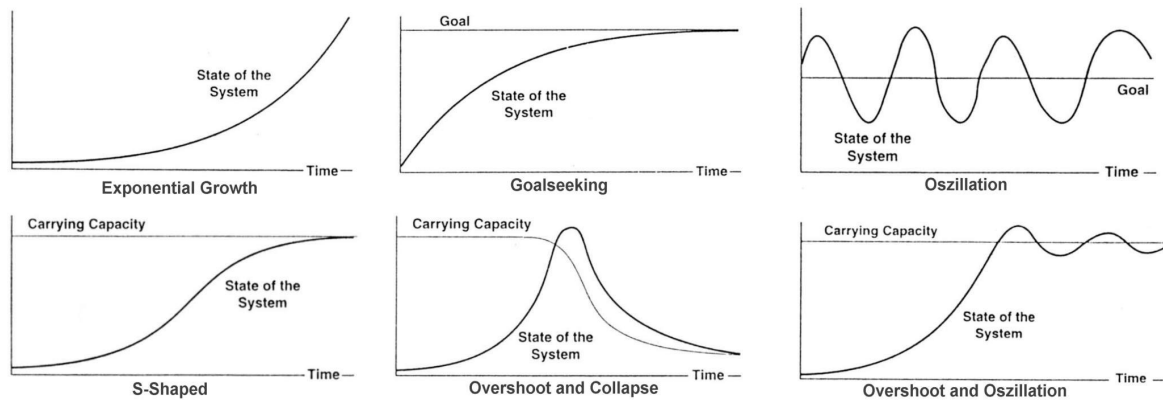
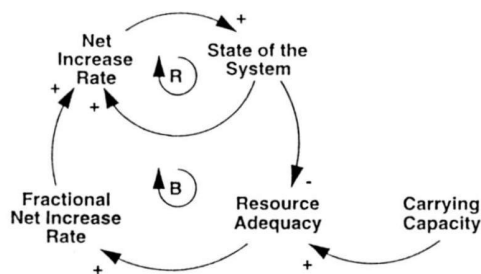


Abbildung 5-4: Charakteristische Verhaltensmuster dynamischer Systeme [Kirkwood 1998, S. 30; Sterman 2000, S. 108ff.]

Während die intuitive Bestimmung des Verhaltens einfacher Schleifen noch möglich ist, kann das dynamische Verhalten von mehreren Schleifen nur durch Computerprogramme gelöst werden [Sterman 2000, S. 14]. Bei exponentiellem Wachstum zeigt das System mindestens eine positive Rückkopplungsschleife. Oszillation läßt auf eine negative Rückkopplungsschleife mit Zeitverzögerung schließen. S-förmiges Wachstum ist auf positive und negative Rückkopplungsschleifen zurückzuführen, die nichtlinear miteinander verbunden sind und keine signifikanten Zeitverzögerungen aufweisen [Sterman 2000, S. 119ff.; Meadows 1980, S. 32ff.]. Abbildung 5-5 zeigt beispielhaft eine Umsetzung des s-förmigen Systemverhaltens in Form eines Kausaldiagramms sowie eines Speicher- und Flußdiagramms:

Causal Loop Diagram:



Stock and Flow Diagram:

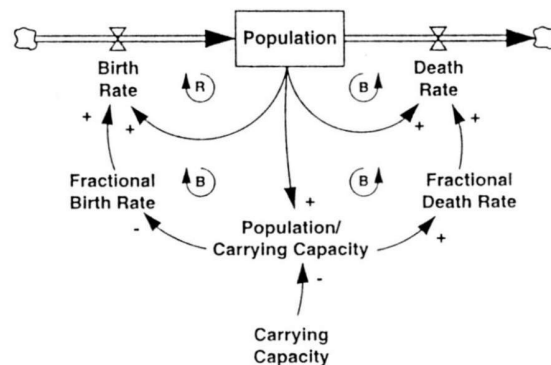


Abbildung 5-5: Nichtlineare Systeme erster Ordnung: S-förmiges Wachstum [Sterman 2000, S. 285; Deaton und Winebreak 1999, S. 3ff.]

5.2 Ziel des Instrumentes zur Entscheidungsunterstützung

Das strategische Planungsinstrument soll Entscheidungsträger dabei unterstützen, die Konsequenzen unterschiedlicher Politikoptionen und Umweltentwicklungen im Individualverkehr zu analysieren und zu bewerten. Hierbei sind die wesentlichen Rückkopplungsbeziehungen zwischen dem Individualverkehr und seinen natürlichen, technisch-ökonomischen, politisch-rechtlichen und gesellschaftlichen Bestimmungsgrößen zu berücksichtigen und in einen dynamischen Zusammenhang zu stellen. Zum einen soll die Entscheidungsfindung vereinfacht

werden, indem bisher ‚unvorhersehbare‘ Störungen während des Simulationslaufs über dynamische Verhaltensgleichungen in das Modell integriert werden. Zum anderen soll mit der Abkehr von Punktprognosen hin zu Zeitverlaufsprognosen die Güte und Aussagekraft der Wirkungsanalyse verbessert werden.

Das Planungsinstrument dient den folgenden Zielen:

- Identifikation von flexiblen, dauerhaft tragfähigen Strategien für den Individualverkehr
- Bewertung der Strategien unter Berücksichtigung der Unsicherheit

Im Rahmen der Abschätzung von Gesetzesfolgen ist ein solches Planungsinstrument in der Lage, wichtige Informationen über Zeitpunkt, Zeitraum und Ausmaß der Einführung von politischen Instrumenten zu liefern. Ordnungsrechtliche und ökonomische Instrumente können explizit als externe Modellinstrumente, zum Beispiel über eine vorgegebene Erhöhung der Emissionsgrenzwerte oder als interne Instrumente, etwa die Erhöhung von Ökosteuern, in das Modell integriert werden. Über Sensitivitätsbetrachtungen kann die Art und das Ausmaß des zu bewertenden umweltpolitischen Instrumentes schrittweise verbessert werden.

5.2.1 Methodisches Vorgehen

In diesem Abschnitt wird das gewählte Vorgehen zur Entwicklung des System Dynamics Modells vorgestellt. Die im folgenden erläuterten Phasen sind dabei weniger nacheinander zu bearbeiten, als vielmehr iterativ zu durchlaufen (Abbildung 5-6) [Stermann 2000, S. 86].¹⁵⁰

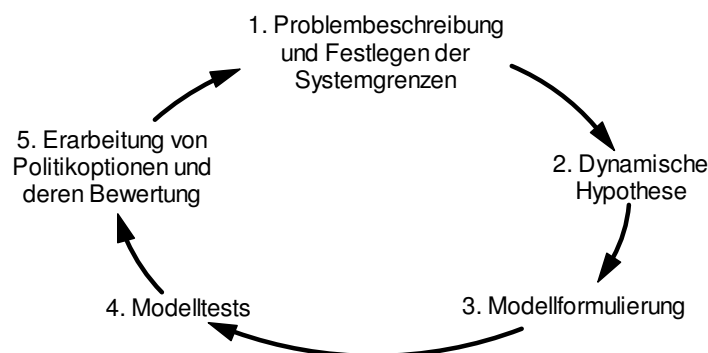


Abbildung 5-6: Entwicklung eines System Dynamics Modells als iterativer Prozeß [Stermann 2000, S. 87; Randers 1980, S. 119ff.]

Zu Beginn der Modellentwicklung ist das betrachtete Problem zu definieren (Phase der ‚*Problemdefinition*‘). Meist wird hierfür ein Referenzmodus entwickelt, der die dynamische Entwicklung des Problems aufzeigt. Die Identifizierung des für das Problem signifikanten Zeit-

¹⁵⁰ Siehe zur methodischen Vorgehensweise bei der Entwicklung von System Dynamics Modellen auch [Stermann 2000, S. 86ff.; Bossel 1992, S. 17ff.].

raums sowie der wesentlichen Systemelemente führt zur Bestimmung der Systemgrenzen [Stermann 2000, S. 89; Roemer 1988, S. 168; Grunwald 2002, S. 169].

Ziel der folgenden Phase (Phase der ‚*Entwicklung einer Dynamischen Hypothese*‘) ist die Entwicklung einer Hypothese über die Ursachen des Problems. Hierzu wird mit Hilfe der unter Abschnitt 5.2 beschriebenen Kausaldiagramme eine Systemanalyse durchgeführt, bei der die für das Systemverhalten relevanten Strukturen definiert, erfaßt und – darauf aufbauend – bereits ‚qualitativ‘ analysiert werden [Stermann 2000, S. 94ff.; Bossel 1992, S. 30, 40ff.].

In der Phase der ‚*Modellformulierung*‘ sind die zuvor identifizierten Wirkungsbeziehungen und Systemgrößen der Kausaldiagramme mit Hilfe von Bestands- und Flußdiagramme genauer zu beschreiben (‚Struktur des Simulationsmodells‘). Auf Grundlage dieser Modellstruktur werden dann die Zusammenhänge mathematisch formuliert. Zur Erstellung eines simulationsfähigen Modells sind zudem eine Parametrisierung der Konstanten durchzuführen, Anfangswerte der Variablen festzulegen und Entscheidungsregeln zu bestimmen [Bossel 1992, S. 40ff.; Stermann 2000, S. 102f.].

Die Phase der ‚*Modellanalyse*‘ prüft die Gültigkeit des Modells. Hierbei wird zum einen getestet, ob das Modell in der Lage ist, den in der Phase der Problemdefinition entwickelten Referenzmodus wiederzugeben. Zum anderen sollte das Modell auch bei extremeren Einstellungen robuste Ergebnisse liefern. Beides dient dazu, das Realsystem möglichst konsistent und plausibel abzubilden und damit zur Beantwortung der zuvor definierten Fragen des Modellanwenders beizutragen [Bossel 1992, S. 40ff.].

Der letzte Schritt der Modellierung soll Strategien, Maßnahmen und Entscheidungsregeln ableiten (Phase der ‚*Strategieentwicklung und Bewertung*‘), welche das Systemverhalten verbessern können. Hierbei ist darauf zu achten, daß die veränderten Modellstrukturen auch im Realsystem umsetzbar sind. Nach einer geeigneten Auswahl und Definition von Beurteilungskriterien sind die Konsequenzen der Systemintervention durch Simulationsstudien zu untersuchen [Bossel 1992, S. 40ff.; Gardiner und Ford 1980].

In den folgenden Abschnitten werden die Phasen der ‚Problemdefinition‘, der ‚Entwicklung der dynamischen Hypothese‘ und der ‚Modellformulierung‘ zur Erstellung eines strategischen Planungsinstrumentes des Individualverkehrs beschrieben. Die Phasen der ‚Modellanalyse‘ sowie ‚Strategieentwicklung und Bewertung‘ werden anhand von Fallbeispielen in Kapitel 6 erläutert.

5.2.2 Problemdefinition

Um die negativen externen Effekte des Individualverkehrs wie Schadstoff- und Kohlendioxidemissionen zu vermindern, bedient sich der Gesetzgeber zunehmend ordnungsrechtlicher und ökonomischer Instrumente und greift auf diese Weise auch in den Spielraum unternehmerischer Entscheidungsträger ein. Die Wirkungen politischer Inzentivierungen sind indes nur in

wenigen Fällen dauerhaft tragfähig im Hinblick auf ökologische Treffsicherheit, ökonomische Effizienz und dynamische Anreizwirkung. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Aufgabe, Auswirkungen ordnungspolitischer Maßnahmen auf wichtigen Märkten bereits vor der Umsetzung treffsicher abzuschätzen, um rechtliche Maßnahmen ex-ante zu verbessern und zu vereinfachen. Mit Hilfe des zu entwickelnden Entscheidungsmodells soll dem – sowohl politisch als auch unternehmerisch – Handelnden ein Werkzeug an die Hand gegeben werden, mit dem er seine Entscheidungen sicherer treffen und die Folgen daraus besser vorhersehen kann.

Eine geeignete Bewertungsmethodik für den Individualverkehr hat in Anlehnung an die vom Umweltbundesamt (UBA) und der EU-Kommission genutzten Verkehrs- und Emissionsmodelle TREMOD und TREMOVE folgende Systemelemente in ihrem zeitlichen Verlauf zu berücksichtigen [ÖIR 2002, S. 5; BMUJF 1998]:

- Fahrzeugbestand (z.B. in Hubraumklassen),
- durchschnittliche Fahrleistung (eventuell differenziert nach Fahrmodi und Straßentyp),
- technisches Konzept von Motor und Antriebsstrang, meistens parametrisiert durch mittleren Verbrauch und spezifische Emissionen,
- vorgelagerte Emissions- und Verbrauchsprozesse (z.B. Kraftstoffschwefelgehalt),
- absolute Schadstoff- und CO₂-Emissionen

Im Mittelpunkt der Betrachtung stehen der Antrieb und die damit verbundene Verbrennung von Kraftstoffen zu Emissionen. Steuergröße sind dabei die Höhe und Zusammensetzung des Fahrzeugbestandes und die Fahrleistungen. In einem Submodell ist die Technik pro Kraftfahrzeugklasse in einer Transition mit geeigneten Parametern (z.B. durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch, Kraftstoffqualität) abzubilden. Die sich aus dem Fahrzeugalter ergebenden spezifischen Emissionen bestehend aus Basisemissions- und Kaltstartfaktoren sowie Parameter zur Berechnung von Abstellemissionen und Tankatmung sollten dabei auch die schrittweise Veränderung durch Motor- und Getriebeoptimierungen berücksichtigen. Das Ausmaß der Emissionen bestimmt sich auch durch die Fahrleistungen. Wie bereits in Kapitel 2 erläutert, wird der politische Entscheidungsträger das Anwachsen der Fahrleistungen indes nicht einschränken wollen, weil die individuelle Mobilität Teil des Wirtschaftswachstums ist. Da auch die betrieblichen Entscheidungsträger im Rahmen der Produktstrategie auf die Fahrleistung selbst keinen Einfluß haben, steht demzufolge die Beeinflussung zur Zusammensetzung des Fahrzeugbestandes im Mittelpunkt der Betrachtung. Mit Ausnahme der spezifischen Geschwindigkeitsmuster Deutschlands und Japans erübrigt sich damit auch die detaillierte Aufteilung der Fahrleistung nach Fahrweise (z.B. innerörtlicher und außerörtlicher Verkehr, Stop-and-Go-Verkehr) und Straßentyp (z.B. Längsneigungen¹⁵¹), was die Verkehrsdatensammlung, -aufbereitung und -auswertung beträchtlich vereinfacht [IFEU 2002, S. 11ff., S. 37ff.;

¹⁵¹ So ergeben beispielsweise aufgrund der Geographie (Längsneigungen) signifikante Unterschiede der Emissionsberechnung der Niederlanden und Belgiens.

Herbruggen 2002; TREMOVE 2004, S. 3ff.]. Bei den Schadstoff- und CO₂-Ausstößen muß zwischen den direkten, also am Ort der erbrachten Fahrleistung freigesetzten, Emissionen sowie Emissionen aus vorgelagerten Prozessen, etwa bei der Bereitstellung von elektrischer Energie im Kraftwerk oder der Aufbereitung von Kraftstoffen in Förder- und Raffinerieanlagen, unterschieden werden. Da, wie in Kapitel 2 bereits erwähnt, die Nutzungsphase den Gesamtlebenszyklus eines PKW dominiert, konzentrieren sich die folgenden Ausführungen jedoch auf die Phase des Fahrzeugbetriebs [Schmidt 1994b, S. 66].

In einer Erweiterung dieses Grundmodells ist die Politik als Einflußgröße („policies“) zu berücksichtigen. Der Staat versucht die Schadstoff- und CO₂-Emissionen mit Hilfe umweltpolitischer Instrumente in eine bestimmte Richtung zu lenken und dabei das für Umweltmaßnahmen zur Verfügung stehende Budget zu kontrollieren. Hierbei stehen zum Beispiel die in Kapitel 3 erläuterten Verbrauchsteuern (Ökosteuern), Bonus-/Maluszahlungen und Verschrottungsprämien zur Verfügung.

5.2.3 Entwicklung einer dynamischen Hypothese

Um die entscheidenden Modellhypothesen zu entwickeln, soll im Folgenden das Systemverhalten von Gesetzesfolgen mit Hilfe eines Kausaldiagramms dargestellt werden [Randers 1980, S. 119ff.]. Die fettmarkierte Variable ‚Ordnungspolitik‘ als wesentlicher Treiber des Systems bildet den Startpunkt des Diagramms in Abbildung 5-7 und beeinflusst mit Regulierungen die ‚Unternehmenspolitik‘. Die Unternehmenspolitik versucht wiederum über Industrieverbände auf den Gesetzgeber einzuwirken. Aus den ‚Wirkungen, Aktionen und Reaktionen‘ beider Seiten folgen Reaktionen der ‚Gesellschaft‘. So reagiert die breite Öffentlichkeit gegenüber dem Gesetzgeber in freien Wahlen oder indem sie ihre Interessen mittels Nichtregierungsorganisationen artikuliert. Im Wechselspiel mit Unternehmen reagiert die Gesellschaft durch Produktkauf oder Boykott von Waren. Diese Rückkopplungen haben wiederum Reaktionen der Wissenschaft zur Folge, die Ihren Blick bei der Bewertung von Gesetzesfolgen sowohl auf den Gesetzgeber als auch auf den unternehmerisch Handelnden richtet.

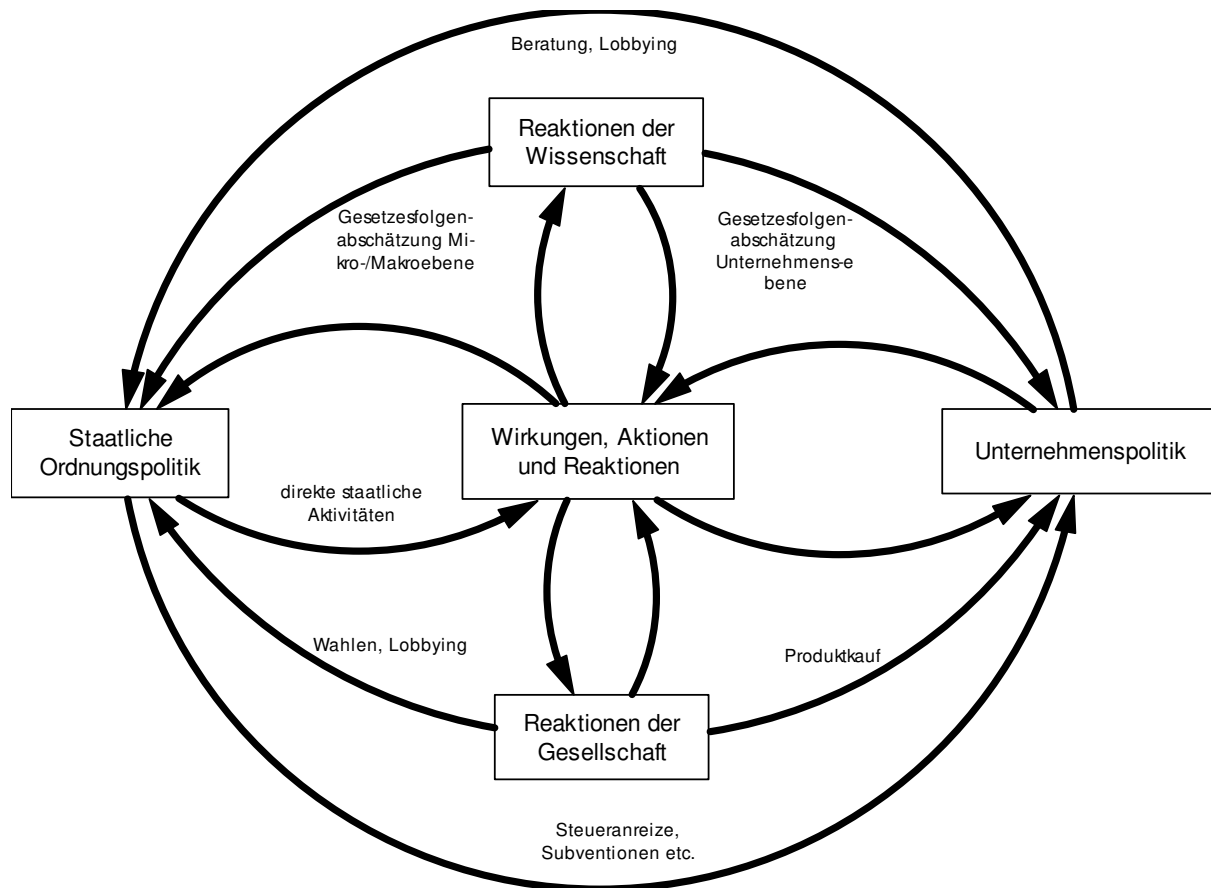


Abbildung 5-7: Kausaldiagramm zur Erklärung des problematischen Verhaltens von Gesetzesfolgen

Zwischen staatlicher Ordnungspolitik und Unternehmenspolitik ist demnach ein komplexes Wechselspiel zu beobachten. In Analogie zu dem Wasserregulierungssystem in Abbildung 5-2 stellt der Gesetzgeber eine ‚Lücke‘ zwischen gewünschtem Umweltziel (siehe Abschnitt 3-1) sowie der Entwicklung der tatsächlichen Emissionen (siehe Abschnitt 2-1) und den für Umweltausgaben zur Verfügung stehenden Haushaltsmitteln fest. Mit Hilfe von Bonus-/Maluszahlungen, Abgasnormen und Verschrottungsprämien (siehe Abschnitt 3.3) versucht der politisch Handelnde lenkend in die Zusammensetzung des Fahrzeugbestandes einzugreifen. Die Bestandszusammensetzung hat dabei direkten Einfluß auf die Emissionen und das Umweltbudget.

Abbildung 5-8 überträgt die Rückkopplung zwischen Politik und Unternehmen in ein Stoffstrommodell. Hierbei kommt ein mit Petri-Netzen vergleichbares Modellierungskonzept zur Anwendung¹⁵², welches aus zwei verschiedenen Arten von Knoten besteht: Stellen (P) und Transitionen (T). Stellen sind passive Lager, die Bestände aufnehmen, in denen keine Veränderung der Materialien geschieht, also auch keine Energie verbraucht wird. Transitionen sind die aktiven Knoten, in denen Materialien umgewandelt werden; Materialien treten in bestimmten Mengen in den Knoten ein, werden durch einen Prozess verändert und dieselben

¹⁵² Die Abbildung des Stoffstrommodells erfolgt mit Hilfe der Software ‚umberto‘ zur Modellierung, Berechnung und Visualisierung von Stoff- und Energieflüssen [Eigene Darstellung nach Schmidt 2003].

oder andere Materialien verlassen in bestimmten Mengen die Transition. Die Systemgrenzen befinden sich an den Input- bzw. Output-Stellen.

Im oberen Schaubild sind die Kraftstoffvorkette (P1, P5, T1, P2), die Bestände diverser Kraftfahrzeugklassen (P3), die durchschnittliche Jahresfahrleistung in km/Jahr (P4) als Input-Stelle, die Gesamtfahrleistung (P6) in km/Jahr und die Emissionen (P5) in t/Jahr als Output-Stelle angegeben. Das ‚Regulierungssystem Umweltpolitik‘ beeinflusst als Reaktion auf die Emissionen (P5) den Fahrzeugbestand. Der zentrale Prozeß ist der Antrieb im unteren Schaubild und die damit verbundenen unterschiedlichen Technikkonzepte T1 bis T4 (Dieselantrieb ohne Filter, DoF oder Benzinantrieb mit Katalysator, BmK) – meist parametrisiert durch mittlere Verbrauchsdaten und Emissionsfaktoren.

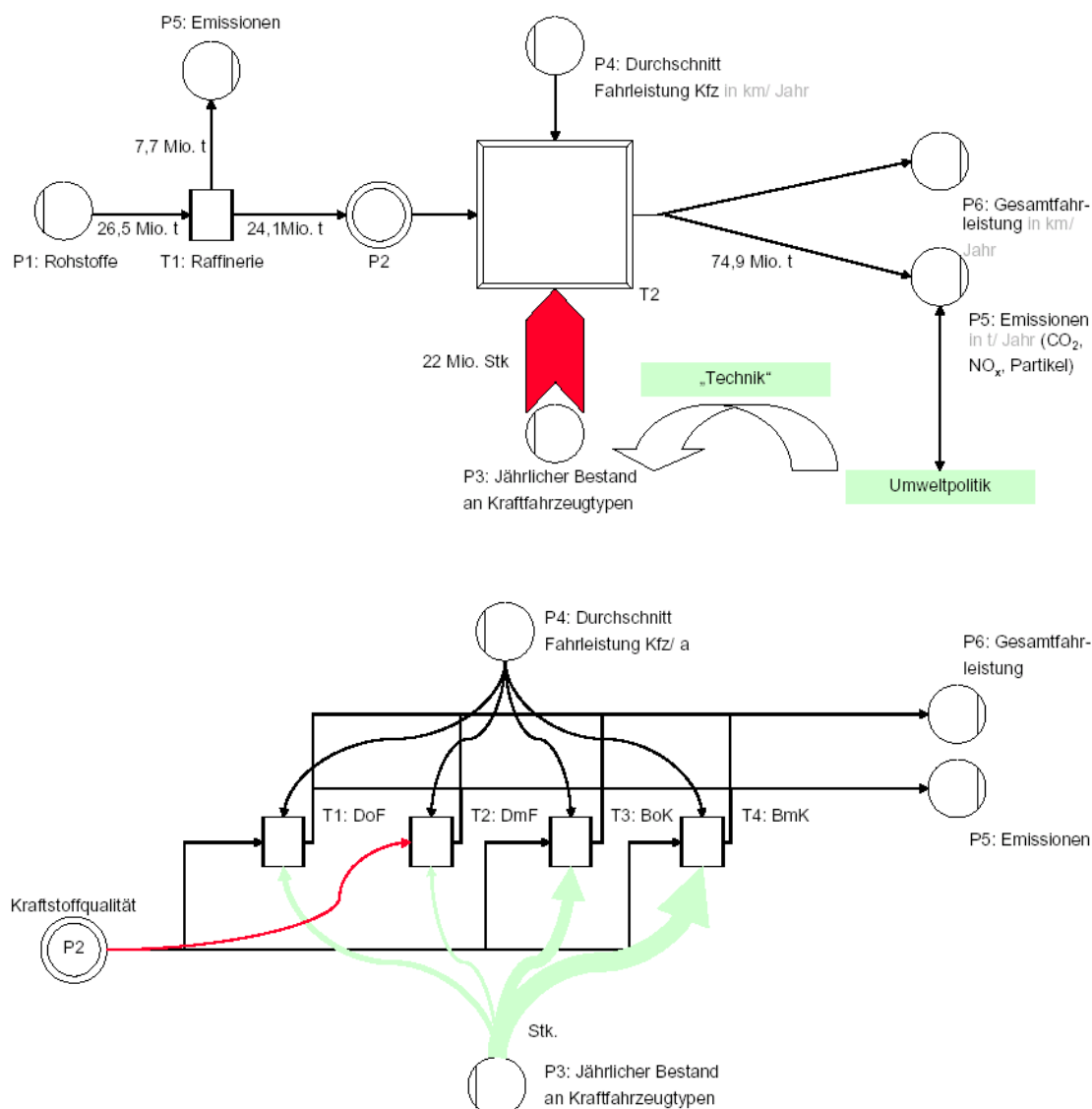


Abbildung 5-8: Grundstruktur eines Verkehrs- und Emissionsmodells [Eigene Darstellung nach Schmidt 2003]

Der Individualverkehr beruht auf Aktivitätsmustern des Menschen in Zeit und Raum, wobei unterschiedliche Determinanten, wie sozioökonomische Struktur, Raumstruktur, Technologie oder politisch-rechtliche Rahmenbedingungen, auf den Individualverkehr einwirken (siehe

Kapitel 2). Der Systemansatz in der strategischen Planung des Individualverkehrs versucht hierbei, die wesentlichen Wirkungsbeziehungen zwischen dem Verkehr und seinen Bestimmungsgrößen, deren Reaktionsmechanismen sowie die Bewertung dieser Wirkungen in einem Modellansatz zu behandeln. Diese sogenannten Assessment-Verfahren basieren auf drei Komponenten [Kuchenbecker 1999, S. 38]:

- Systembeschreibung und Modellierung
- Prognose von Auswirkungen
- Bewertung von Auswirkungen

Veränderungen bei einer Zielgröße führen über Veränderungen bei anderen Zielgrößen zu entscheidungsbestimmenden Wechsel des Verkehrsverhaltens. So können Veränderungen in der Umweltsituation und den daraus folgenden politisch-rechtlichen Maßnahmen, etwa der Verschärfung von Emissionsgrenzwerten zu einer Veränderung privater Präferenzen und damit zu einem neuen Mobilitätsverhalten führen.

5.3 Modellformulierung

In diesem Abschnitt wird die Entwicklung des Simulationsmodells erläutert. Hierzu werden die in den vorangegangenen Abschnitten identifizierten Wirkungszusammenhänge sowie die festgestellten Ansätze zur Verbesserung des Systemverhaltens in Form von Bestands- und Flußdiagrammen modelliert und die funktionalen Zusammenhänge mathematisch formuliert.

5.3.1 Managementsimulatoren

Die Zusammenhänge zwischen Emissionen des Individualverkehrs, der Entwicklung alternativer Antriebe und Kraftstoffe und die Option der Beeinflussung dieser Entwicklung durch den Einsatz politischer Lenkungsinstrumente sind sehr komplex und kaum intuitiv vorherzusagen. Die Bewertung alternativer Antriebs- und Kraftstoffstrategien mit Hilfe von System Dynamics Modellen basiert daher auf einem Simulationsmodell, welches das Realsystem möglichst konsistent und plausibel abbildet.

Das Verständnis der Wirkungszusammenhänge umweltpolitischer Entscheidungen erfordert ein Wissen, welches im Wesentlichen aus der Erfahrung kommt. Um diese Kenntnisse nicht erst bei der – in der Regel fehlerbehafteten – Umsetzung zu erlangen („trial and error“), sondern relativ gesicherte Entscheidungen auf einer fundierten Grundlage zu treffen, bieten sich sogenannte Managementsimulatoren oder Autopiloten („Management Flight Simulator“) an [Ford 1999, S. 253; Schwaninger und Hechenblaickner 2002, S. 71ff.].

Vergleichbar mit dem Einsatz von Flugsimulatoren bei der Schulung von Verkehrspiloten, sollen ‚künstlich‘ die Bedingungen und Verhältnisse hergestellt werden, wie sie in Wirklichkeit bestehen, um damit ‚Lernen durch interaktives Experimentieren‘ zu fördern. Bei der Ausbildung zum Flugzeugführer dienen Flugsimulatoren dem Zweck, die Piloten mit den Reaktionen des komplexen Systems eines Verkehrsflugzeugs auf verschiedene Steuerungs-

und Systemeingaben vertraut zu machen. Die bei diesem Lernprozeß zwangsläufig auftretenden Fehler verursachen keine Schäden oder Gefahren. So ermöglicht der Flugsimulator das Experimentieren extremer Situationen und das Testen der richtigen Reaktion auf unterschiedliche Impulse. Der Managementsimulator soll Lenkungswirkungen vorhandener Instrumente richtig einschätzen und geeignete Reaktionen auf exogene Ereignisse ermöglichen, ohne daß Fehlentscheidungen bereits negative Folgen im Realsystem nach sich ziehen [Senge 1996, S. 313; Morecroft and Sterman 1994].

So simuliert Andrew Ford zum Beispiel mit Hilfe eines Managementsimulators, wie sich Bonus- und Maluszahlungen („feebates“¹⁵³) sowie die Einführung einer Verbrauchssteuer für Kraftstoffe auf die Zusammensetzung des Fahrzeugbestands und damit auf die Abgasemissionen auswirken. Betrachtet wird hierbei das „South Coast Air Quality Management District (SCAQMD)“ im Süden Kaliforniens, welches besonders unter der Schadstoffbelastung durch den Individualverkehr leidet (siehe Abschnitt 2.4.2).

5.3.2 Steuer- und Rabattmodell

Ausgangspunkt der folgenden Modellentwicklung ist das Modell eines Managementsimulators oder Autopiloten. Im Rahmen dieser Arbeit wird der obengenannte Managementsimulator von Andrew Ford als Idee herangezogen und um weitere alternative Antriebe und Kraftstoffe erweitert. Darüber hinaus werden zusätzliche politische Lenkungsinstrumente berücksichtigt. Durch die Einbeziehung einer automatischen Regelung der Entscheidungsvariablen, die sich von einer entsprechend vorgegebenen Umweltpolitik ableitet, wird die Simulation um geschlossene Regelkreise erweitert. Der Flugsimulator des Managements und die damit verbundenen Lerneffekte gestalten sich auf diese Weise noch effektiver.

In diesem Abschnitt soll zunächst der Managementsimulator von Andrew Ford erläutert werden. In diesem Steuer- und Rabattmodell werden fünf Fahrzeugtypen unterschieden [Ford 1999, S. 260]:

- Fahrzeuge mit Benzinmotor (conventional gasoline vehicle CV)
- Methanolbetriebene Fahrzeuge (alcohol or methanol vehicle AL)
- Batteriebetriebene Fahrzeuge (electric vehicle EV)
- Hybridfahrzeuge mit Benzin- und Elektromotor (hybrid electric HEV)
- Erdgasfahrzeuge mit Druckgastank (compressed natural gas CNG)

Das Modell berücksichtigt ausschließlich die Emissionen von Kohlenwasserstoffen (HC), wobei die spezifischen Emissionen der einzelnen Fahrzeugtypen im untersuchten Zeitraum von 2000 bis 2016 konstant bleiben. Ziel ist es, den Absatz von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben voranzutreiben und damit (letztlich) auch die Fahrzeugentwicklung der Hersteller

¹⁵³ „feebate“ ist eine Zusammensetzung der Wörter „fee“ (Steuern, Abgaben) und „rebate“ (Rabatt) [Ford 1999, S. 258].

zu beeinflussen. Das wirksamste politische Lenkungsinstrument in diesem Modell sind die Bonus- und Maluszahlungen, welche den Kaufpreis der Fahrzeugtypen und damit deren Marktanteile beeinflussen. Elektro- (EV), Hybrid- (HEV) und Erdgasantriebe (CNG) werden mit Bonuszahlungen gefördert, während Fahrzeuge mit Ottomotor (CV) und Alkohol- beziehungsweise Methanolfahrzeuge (AL) mit zusätzlichen Maluszahlungen belegt werden. Die Einnahmen aus der Besteuerung von Benzin (Verbrauchssteuer) fließen ebenfalls in den Haushalt ‚balance in fund‘ (Speicher), aus dem die Bonuszahlungen gegenfinanziert werden (Abbildung 5-9) [Ford 1999, S. 261].

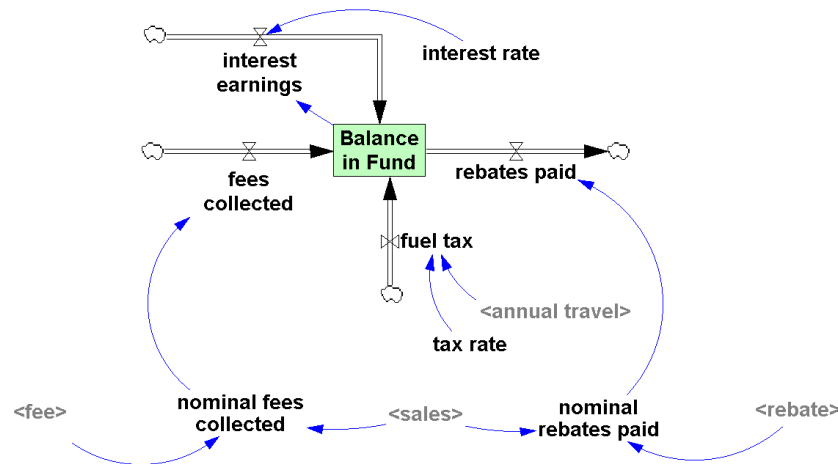


Abbildung 5-9: Budget aus Bonus- und Maluszahlungen sowie Verbrauchssteuern [Ford 1999, S. 266].

Die Zinsrate (interest rate) beträgt jährlich 6,5 Prozent, dementsprechend berechnen sich die Zinsen wie folgt:

$$(1.) \text{ interest earnings} = \text{Balance in Fund} * \text{interest rat.}$$

Die Steuereinnahmen (fees collected) ergeben sich aus der Summe der Steuererträge der einzelnen Fahrzeugtypen (nominal fees collected). Diese sind von der Anzahl verkaufter Fahrzeuge (sales) sowie vom Steuerbetrag (fee) pro Fahrzeugtyp abhängig:

$$(2.) \text{ nominal fees collected[model]} = \text{fee[model]} * \text{sales[model]}.$$

Die Gesamtsumme an gewährten Rabatten (rebates paid) ergibt sich aus den Einzelrabatten pro Fahrzeugtyp (nominal rebates paid), die von der Anzahl verkaufter Fahrzeuge und den jeweiligen Rabatten (rebates) bestimmt werden:

$$(3.) \text{ nominal rebates paid[model]} = \text{rebate[model]} * \text{sales[model]}.$$

Die Zusammensetzung des Fahrzeugbestands wird über den Verkauf von Neufahrzeugen beeinflusst. Um das Käuferverhalten als Reaktion auf den Einsatz politischer Lenkungsinstrumente hierbei abzubilden, wird auf die unter Abschnitt 4.4.2 erläuterte Theorie diskreter Auswahlentscheidungen in der Form des Multinomial Logit Modells (MNL) zurückgegriffen

[Ford 1999, S. 265; Bunch et al. 1992, S. 13ff.].¹⁵⁴ Beim MNL-Modell bestimmt sich der Marktanteil (market share of vehicle type, MS) nach der folgenden Gleichung [Bunch et al. 1992, S. 23ff.; Naert und Bultez 1972]:

$$(4.) \quad MS_v = \frac{e^{U(v)}}{\sum_{v \in V} e^{U(v)}}$$

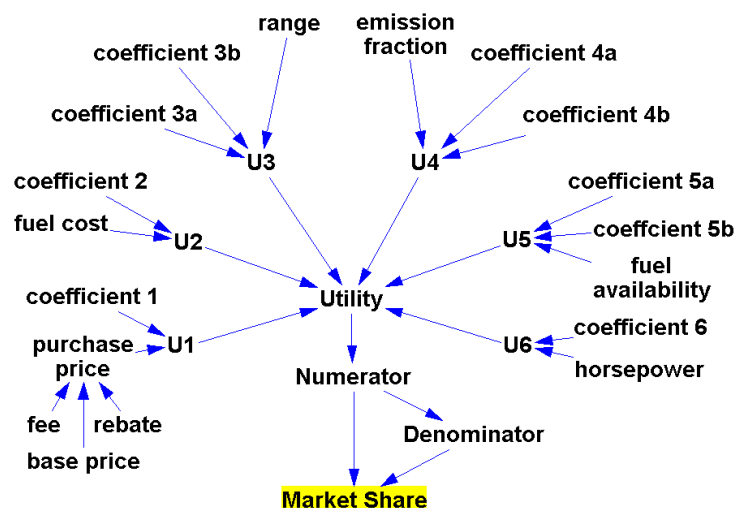
Der Gesamtnutzen U_v eines Fahrzeugtyps v ergibt sich aus der Summe der einzelnen Fahrzeugattribute, wobei V die Indexmenge aller Fahrzeuge ist. Für die Implementierung in die Simulationssoftware VENSIM kann die Formel folgendermaßen umgeschrieben werden:

$$(5.) \text{ Market Share[model]} = \text{Numerator[model]} / \text{Denominator}$$

$$(6.) \text{ Numerator}[model] = EXP(Utility[model])$$

(7.) *Denominator* = *SUM*(*Numerator*[*model!*]).

Der Index v , gleichbedeutend mit $[model]$, steht für den jeweiligen Fahrzeugtyp und $U_i(v)$ für den Teilnutzen eines Fahrzeugs v bezüglich der Eigenschaft i . Die Eigenschaften i ($1, \dots, n$) umfassen hierbei den Kaufpreis ($i=1$), die variablen Kraftstoffkosten ($i=2$), die Reichweite ($i=3$), die Emissionen ($i=4$), die Kraftstoffverfügbarkeit ($i=5$) und die Motorleistung ($i=6$) [Ford 1999, S. 265]. Die einzelnen Koeffizienten stehen für den Kaufpreis (U_1), für die variablen Kraftstoffkosten (U_2), für die Reichweite (U_3), für die Emissionen (U_4), für die Kraftstoffverfügbarkeit (U_5) und für die Motorleistung (U_6). Die Koeffizienten werden aus der Studie von Bunch übernommen und bleiben bei der Simulation konstant (siehe Abbildung 5-10).



¹⁵⁴ In dieser Studie werden 2750 Haushalte in Kalifornien nach ihren Präferenzen für unterschiedliche Fahrzeugeigenschaften (utilities) befragt [Bunch et al. 1992, S. 23ff.; Naert und Bultez 1972].

Abbildung 5-10: Berechnung der Marktanteile [Ford 1999, S. 265]

Der Gesamtnutzen U_v eines Fahrzeugtyps v ergibt sich aus der Summe der Einzelnutzen U_i der Fahrzeugattribute i ($i=1, \dots, n$)

$$(8.) \quad U_v = U_1(v) + \dots + U_n(v) = \sum_{i=1}^n U_i(v)$$

Durch die Multiplikation des jeweiligen Fahrzeugattributs mit dem in der Bunch-Studie bestimmten Koeffizienten erhält man die einzelnen Nutzenfunktionen der Fahrzeugeigenschaften. Es treten sowohl lineare als auch nichtlineare Funktionsverläufe für die Eigenschaften auf, abhängig davon, ob ein oder zwei Koeffizienten zur Berechnung eingesetzt werden. Demnach stellt der ‚Nutzen‘ im Prinzip die Preiselastizität des Haushaltes hinsichtlich einer bestimmten Fahrzeugeigenschaft dar. Die Eigenschaften der verschiedenen Fahrzeugtypen berechnen sich folgendermaßen [Ford 1999, S. 265; Bunch et al. 1992, S. 25]:

$$(9.) \quad U1(v) = coef_1 * purchase_price(v),$$

$$(10.) \quad U2(v) = coef_2 * fuel_cost(v),$$

$$(11.) \quad U3(v) = coef_3A * (range(v)) + coef_3B * ((range(v))^2),$$

$$(12.) \quad U4(v) = coef_4A * emission_fr(v) + coef_4B * emission_fr(v)^2,$$

$$(13.) \quad U5(v) = coef_5A * fuel_availability(v) + coef_5B * fuel_availability(v)^2,$$

$$(14.) \quad U6(v) = coef_6 * horse_power(v).$$

Mit dem Teilnutzen aus den Gleichungen (8) bis (13) lassen sich die Marktanteile der einzelnen Fahrzeugtypen in Gleichung (4) berechnen. Im Simulationsmodell von Ford bleiben bis auf den Kaufpreis und die Kraftstoffkosten alle Fahrzeugattribute und die Konsumentenpräferenzen über die Zeit konstant [Ford 1999, S. 260].¹⁵⁵ Kaufpreis und Kraftstoffkosten können über die Rabatte und Steuern variiert werden. Damit können umweltpolitische Maßnahmen zur Veränderung der Marktanteile ausgeübt werden.

Aus Abbildung 5-11 wird ersichtlich, daß eine Bonus-/Maluspolitik einen direkten Einfluß auf den Kaufpreis und somit den Nutzen $U1$ hat. Der Kaufpreis berechnet sich folgendermaßen:

$$(15.) \quad purchase\ price[model] = base\ price[model] + fee[model] - rebate[model].$$

¹⁵⁵ Die Annahme gegebener Nutzenfunktionen ist zur Vereinfachung bei der Modellierung angemessen. Gleichwohl sind Präferenzen und Nutzenfunktionen von Individuen im Zeitverlauf wandelbar, beispielsweise durch Verbraucherinformationen und ökologisches Marketing (siehe Abschnitt 3.3.6.3 und 3.3.6.4) [Bossel 1992, S. 11, 29].

In dem kalifornischen Modell von Ford werden die Steuern und Rabatte als absolute Beträge angegeben und können daher einfach durch Addition beziehungsweise Subtraktion in die Berechnung des Kaufpreises einbezogen werden. Die Kraftstoffkosten (fuel cost) werden durch den Kraftstoffpreis pro Mengeneinheit und den durchschnittlichen Verbrauch des Fahrzeugtyps errechnet:

$$(16.) \text{ fuel cost}[Gasoline] = (\text{cost of fuel per gallon} + \text{tax rate})[Gasoline] / \text{miles per gallon} [model].$$

Die Kraftstoffsteuern werden als absolute Beträge pro Mengeneinheit angegeben und können auf der Benutzeroberfläche variiert werden. Die Marktverteilung (market share) hat einen erheblichen Einfluß auf die Neuzulassungen (sales) der einzelnen Fahrzeugtypen und damit auf die Zusammensetzung des Fahrzeugbestandes (cars). Der Fahrzeugbestand als Speicher akkumuliert den Zufluß der jährlichen Neuzulassungen (sales) des jeweiligen Fahrzeugtyps. Die Akkumulation erfolgt mit einer Integralfunktion (INTEG):

$$(17.) \text{ INTEG}(\text{rate}, \text{initial value}) = \text{initial value} + \int \text{rate}.$$

Nach einer Lebensdauer (lifetime) von zehn Jahren scheiden die Fahrzeuge aus dem Fahrzeugbestand aus (retired). Der Anfangsbestand an Fahrzeugen mit Benzinmotor (CV) beträgt 10 Millionen (initial number of cars). Der Anfangsbestand der übrigen Fahrzeuge wird mit Null angegeben.

$$(18.) \text{ Cars (million)}[model] = \text{INTEG}((\text{sales})[model] - \text{retired})[model], \text{ initial number of cars}[model].$$

Die Neuzulassungen der einzelnen Fahrzeugtypen ergeben sich aus den jeweiligen Marktanteilen (market share) und aus der kumulierten Anzahl an jährlich verkauften Fahrzeugen (total sales):

$$(19.) \text{ sales } [model] = \text{Market Share}[model] * \text{total sales}.$$

Die Marktanteile werden – wie oben beschrieben – einzeln berechnet. Die seit dem Startzeitpunkt verkauften Fahrzeuge errechnen sich aus dem Anfangsbestand (initial sales) sowie der jährlichen Wachstumsrate (growth fraction). Der Anfangsbestand im kalifornischen Modell beträgt 1,6 Millionen PKW. Das Wachstum wird über eine ‚Gaming‘-Variable definiert, mit welcher der Anfangswert von 4,7 Prozent beliebig verändert werden kann. Die Simulation beginnt im Jahr 2000 und läuft über 16 Jahre. Die Berechnung erfolgt mit einer Exponentialfunktion:

$$(20.) \text{ total sales} = \text{EXP}(\text{growth fraction} * (\text{Time} - 2000)) * (\text{initial sales}).$$

Zusammenfassend wird zusätzlich der Gesamtfahrzeugbestand (‘total cars in use’) durch Addition aller Fahrzeuge berechnet:

$$(21.) \text{ total cars in use} = \text{SUM}(„\text{cars(million)}“[model!]).$$

Mit diesen Daten können die Marktanteile der einzelnen Fahrzeugtypen ermittelt werden:

$$(22.) \text{ market share for cars in use}[model] = \text{„cars(million)“}[model] / \text{total cars in use.}$$

Die jährlichen Gesamtemissionen (annual emissions) errechnen sich aus den Fahrleistungen pro Jahr (annual travel), den anteiligen Emissionen der jeweiligen Fahrzeugtypen an den Standardemissionen (emission fraction) und den Standardemissionen in Gramm pro Meile (standard emission in gram per mile):

$$(23.) \text{ annual emissions by model}[model] = (\text{annual travel}[model] * \text{emission fraction}[model] * \text{standard emission in gram per mile} * \text{grams to pound conversion} / \text{pounds per metric ton}) * \text{MT per ton.}$$

Die jährliche Fahrleistung im kalifornischen Modell beträgt 10.000 Meilen und ist unabhängig vom Fahrzeugtyp. Die Gesamtemissionen ermitteln sich aus der folgenden Formel:

$$(24.) \text{ total emissions} = \text{SUM}(\text{annual emissions by model}[model!]).$$

Mit Hilfe des Managementsimulators kann der Anwender die variablen Einflußgrößen im Zeitverlauf verändern und auf diese Weise unterschiedliche Politikoptionen testen. Nach Ford hat der Benutzer die Aufgabe, durch Einstellung der Bonus- und Maluszahlungen von bis zu 8000 US-Dollar sowie der Kraftstoffbesteuerung von bis zu 100 Cent pro Gallone die HC-Emissionen so gering wie möglich zu halten (total emissions). Dabei soll der zum Zwecke der Umweltentlastung zur Verfügung gestellte Haushalt (Current Cash Balance) möglichst ausgeglichen sein; die Rabatte sollen sich demnach durch die Steuern finanzieren.

Gleichwohl ist im Verlauf der Simulation ein kurzfristiges Überziehen des Budgets erlaubt. Zu Beginn beträgt der Umweltetat 100 Millionen US-Dollar (initial balance). Der Haushalt soll wegen der (finanzpolitischen) Akzeptanz in der Bevölkerung nicht mehr als vier Milliarden US-Dollar an Überschüssen aufweisen sowie weniger als vier Milliarden US-Dollar Verlust einbringen. Ziel ist es, im Jahr 2016 einen ausgeglichenen Haushalt vorweisen zu können und dabei möglichst wenig Kohlenwasserstoff zu emittieren. Um dieses Ziel zu erreichen, kann der Benutzer mit Hilfe des 'Management Flight Simulator' die Werte der Entscheidungsvariablen jährlich anpassen. Die Grundlage seiner Entscheidung liefern unterschiedliche Schaufenster, in denen er das Budget, die Emissionen, den Fahrzeugbestand und die Marktanteile der Fahrzeugtypen ablesen kann [Ford 1999, S. 262].

5.3.3 Erweiterung des Steuer- und Rabattmodells

Das Modell der Bonus- und Maluszahlungen von Andrew Ford spiegelt die Situation im Süden Kaliforniens wider und liefert wertvolle Ergebnisse zum Einsatz von politischen Anreizinstrumenten. Um jedoch die in Kapitel 2 erläuterten Rahmenbedingungen des Individualverkehrs in Deutschland und Japan adäquat zu berücksichtigen und um die in Kapitel 3 aufgezeigten politischen Maßnahmen beider Länder möglichst wirklichkeitsgetreu nachzuahmen, soll der kalifornische Managementsimulator sinnvoll ergänzt werden. Im folgenden

Abschnitt werden die wichtigsten Modellerweiterungen für das deutsche und japanische Planungsmodell beschrieben.

In einem ersten Schritt werden die Einheiten des Modells auf das SI-System (,Systeme International d'Unités, SI) angepaßt. Die Fahrzeugtypen werden auf den deutschen Markt, etwa mit der Berücksichtigung von Dieselfahrzeugen und den japanischen Markt mit unterschiedlichen Benzinmotorklassen angepaßt, wobei hier der Stand des Jahres 2004 gewählt wird. Der simulierte Zeitrahmen erstreckt sich auf die Jahre 2005 bis 2035. Im Rahmen der Berücksichtigung der europäischen und japanischen Abgasnormen wird das Modell um CO, NO_x und PM sowie dem für die weltweite Klimaentwicklung relevanten Treibhausgas CO₂ erweitert.

Um die Emissionen der Fahrzeuge genauer bestimmen zu können, wird für beide Märkte eine Alterungskette eingeführt. Dabei wird angenommen, daß die Emissionswerte der Fahrzeuge mindestens die Werte der zum Zeitpunkt ihrer Erstzulassung geltenden Abgasnorm (siehe Abschnitte 2.4.4 und 2.4.5) erfüllen und bis zur Einführung der nächsten Stufe konstant bleiben, da keine weiteren Anreize für zusätzliche Senkungen der Emissionen bei Neufahrzeugen gegeben sind.

Da sich die EU-Grenzwerte in der Regel in Abständen von fünf Jahren verschärfen, reduzieren sich zum einen die fahrzeugspezifischen Schadstoffemissionen ihrem Alter entsprechend im Abstand von fünf Jahren um den in der Norm geforderten Prozentsatz. Gleichzeitig sinken nach den meisten Prognosen die jährlichen Fahrleistungen pro Fahrzeug mit zunehmendem Fahrzeugalter (siehe Abschnitt 5.7.8.2). Wegen der Einführung der Abgasgrenzwerte (siehe Abschnitt 2.4.4) werden im deutschen Modell vereinfacht alle Fahrzeuge bis zu einem Alter von dreißig Jahren betrachtet, so daß sich insgesamt sechs Altersklassen in der Alterungskette ergeben. Innerhalb jeder Altersklasse wird weiterhin die Anzahl der Fahrzeugstilllegungen berücksichtigt. Die Modellierung der Alterungskette im japanischen Modell erfolgt analog.

Die Kriterien der Kaufentscheidung für einen bestimmten Fahrzeugtyp werden unter Zuhilfenahme von Marktbefragungen auf die Präferenzen deutscher und japanischer Konsumenten angepaßt. Diese Berechnungen fließen bei der Berechnung der Marktanteile bei Neuzulassungen ein und bleiben – genau wie beim kalifornischen Modell – über den gesamten Simulationszeitraum konstant. Dabei werden auch dynamische Marktdurchdringungsprozesse mit Hilfe einer logistischen Verzögerungsfunktion berücksichtigt. Diese Funktion entspricht einem – bei vielen sozioökonomischen Prozessen zu beobachtenden – nichtlinearen (s-förmigen) Verhalten [Stermann 2000, S. 118ff.]. Mit Hilfe einer binären Gaming-Variable hat der Benutzer die Möglichkeit, die Fahrzeugattribute entweder für den konstanten oder den nichtlinearen Fall zu berechnen. Abbildung 5-11 zeigt wie der Adoptions- und Diffusionsprozeß aus „Innovators“, Frühkäufern, früher Majorität, später Majorität und Nachzüglern beim Kauf neuer Techniken in Abhängigkeit von der Region voneinander abweicht.

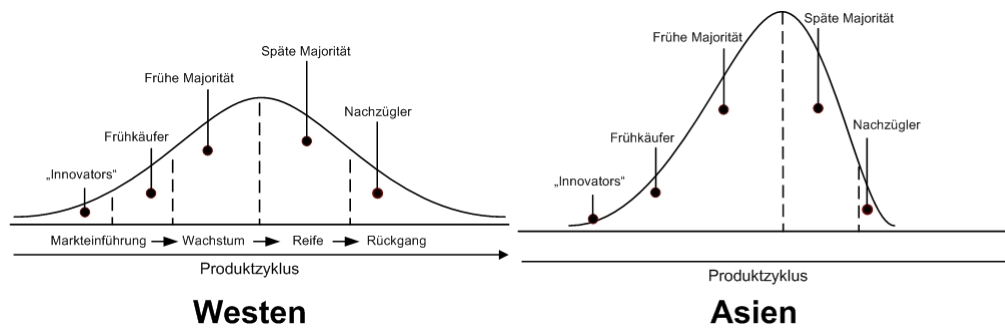


Abbildung 5-11: Westliches und asiatisches Kaufverhalten [Eigene Darstellung nach Schütte 1999, S. 39f.; Mahajan et al. 2000, S. 6]

In Asien zeigt sich eine asymmetrische Form. Der asiatische Kunde (insbesondere Japan) ist qualitätsbewußt, sucht sozialen Status in der Gruppe und will nicht das Risiko auf sich nehmen, neugieriger Erstkäufer (Innovator) zu sein und ein neues Produkt auszuprobieren. Der westliche Kunde ist dagegen durch Individualismus und Selbstverwirklichung geprägt [Murata 1986; Schütte 1999, S. 39f.]. Bei der Annahme feststehender Käuferpräferenzen über die Zeit handelt es sich um eine Modellvereinfachung. Empirische Untersuchungen zeigen, daß sich das Umweltbewußtsein der Käufer über die Zeit ändert [UBA 2006].

Die Verbrauchssteuern auf Kraftstoffe werden entsprechend den Verhältnissen in Deutschland in die Anteile Mineralölsteuer, Ökosteuer und Mehrwertsteuer aufgegliedert, wobei der Entscheidungsträger nur Einfluß auf die Höhe der Ökosteuer nehmen kann. Dabei fließen sämtliche Steuereinnahmen aus der Kraftstoffbesteuerung in den Haushalt der Bonus- und Maluszahlungen. Mit der Berücksichtigung von Verschrottungsprämien (scrappage payments) im deutschen Modell besteht zudem die Möglichkeit, die Anzahl der Stilllegungen von Fahrzeugen, die älter als fünfzehn Jahren sind, zu unterstützen und somit den Kauf neuer und umweltfreundlicherer Fahrzeuge zu fördern.

Neben Deutschland ist auch Japan umweltpolitischer Vorreiter. Die politisch und unternehmerisch Handelnden sind demzufolge auch an der Untersuchung umweltpolitischer Maßnahmen in Japan interessiert, um so beispielsweise den Absatz umweltfreundlicher Fahrzeuge besser antizipieren und gezielt beeinflussen zu können. Bei dem in Abschnitt 3.3.4 beschriebenen japanischen Steueranreizsystem (green tax system) gewährt der japanische Staat den Automobilkäufern zwei Jahre eine Vergünstigung auf die Automobilsteuer. Zur Vereinfachung wird im japanischen Modell angenommen, daß diese Steuerminderung einer Kaufpreisreduzierung gleichkommt.

Abbildung 5-12 zeigt die gesamte Modellstruktur in der Übersicht. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Module des Gesamtmodells genauer erläutert. Beide Modelle sind dabei identisch aufgebaut, wobei sich im Japan-Modell die Inzentivierungen auf Bonuszahlungen und Ökosteuern konzentrieren.

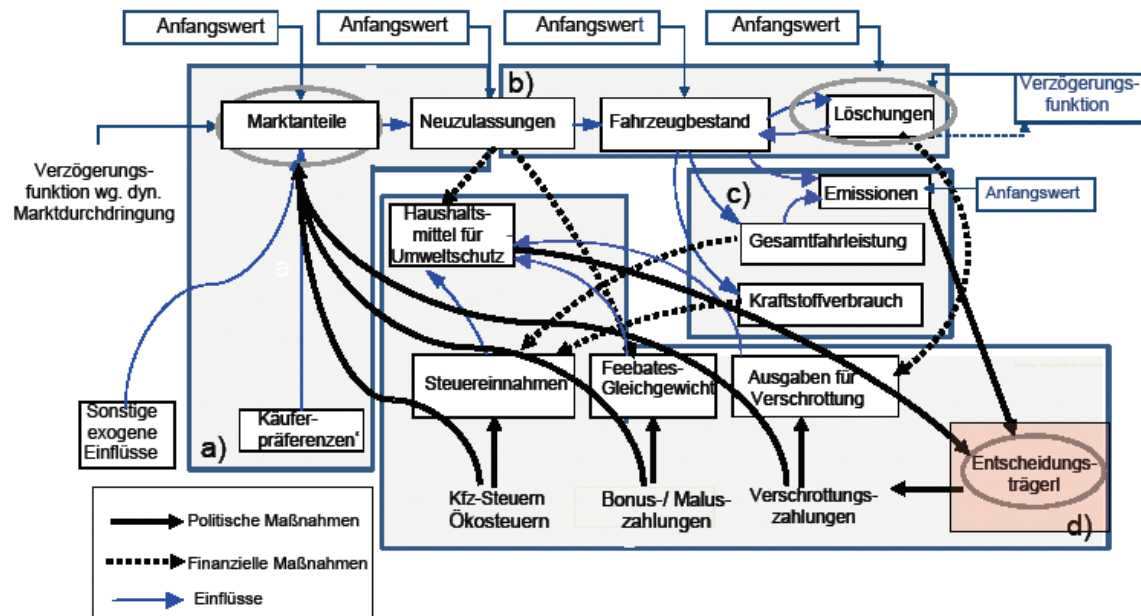


Abbildung 5-12: Übersicht über die Modellstruktur Deutschland und Japan

Der Entscheidungsträger in der Abbildung unten rechts ist vergleichbar mit dem Wasserregulierungssystem in Abbildung 5-2. Vor dem Hintergrund der sich verändernden Emissions- und Budgetziele greift der politisch Handelnde lenkend in das Verkehrssystem ein.

Das kalifornische Modell verwendet für die Variablen und Attributdaten amerikanische Einheiten. Zur Vereinfachung wird das Modell auf SI-Einheiten umgestellt. Der Preis wird anstatt in US-Dollar in der Währungseinheit ‚EURO‘ angegeben. Die Motorleistung der Fahrzeugtypen wird von der Einheit Pferdestärke (PS) auf Kilowatt (kW) umgestellt. Angaben zur Reichweite erfolgen statt in Meilen (mile) in Kilometern (km). Kraftstoffmengen werden im deutschen Modell nicht in Gallonen (gallons), sondern in Litern (l) angegeben. Die Gewichtseinheit Pfund (pound) für die Emissionsangaben wird auf die SI-Einheit Kilogramm (kg) umgestellt. Alle Einheiten und deren Umrechnungsfaktoren finden sich in Tabelle 5-1.

Tabelle 5-1: Umrechnungsfaktoren auf SI-Einheiten [Bosch 2002, S. 21ff.; Börse 2005]

Einheiten im Modell ‚Kalifornien‘			SI-Einheiten		
mile	mile	1	Kilometer	km	1,609
horsepower	PS	1	Kilowatt	kW	0,7355
pound	lb	1	Kilogramm	kg	0,4536
US-Gallon	gal (US)	1	Liter	l	3,7854
US-Dollar	US-\$	1	EURO	EUR	0,742 ¹

¹Stand 03.01.2005 [Börse 2005]

Auch das japanische Modell verwendet SI-Einheiten wie in Tabelle 5.1. Der Preis wird anstatt in Euro oder US-Dollar in der Währungseinheit ‚Japanische Yen‘ angegeben (Tabelle 5-2).

Tabelle 5-2: Umrechnungsfaktor auf SI-Einheiten (US-Dollar in Japanische Yen) [Bosch 2002, S. 21ff.]

Einheiten im Modell ‚Kalifornien‘			SI-Einheiten		
US-Dollar	US-\$	1	Japanische Yen	JPY	112,66 ¹
¹ Stand 19.07.2005 [Börse 2005]					

Die folgenden Abschnitte erläutern die Module des Steuer- und Rabattmodells im Einzelnen.

5.4 Modellstruktur für den deutschen Automobilmarkt

5.4.1 Trennung von Antriebsarten und Kraftstoffsorten

Da es in Zukunft aller Voraussicht nach unterschiedliche Quellen der Energieversorgung für das Antriebsaggregat geben wird (siehe Abschnitt 2.3), löst das Modell für Deutschland die bisherige eindeutige Zuordnung einer Kraftstoffart zu einem Antriebskonzept auf und teilt den Kraftstoffen und den Fahrzeugtypen jeweils eine Indexvariable (subscript) zu. In Abbildung 5-13 sind die möglichen Verbindungen der acht Fahrzeugtypen (vehicle type) mit den sechs Kraftstoffarten (fuel type) im mittleren Bereich dargestellt.

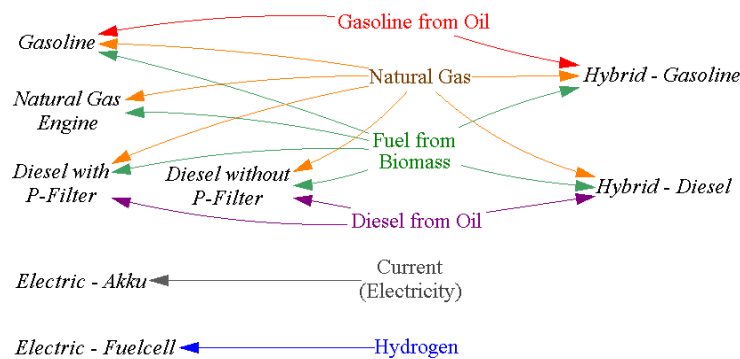


Abbildung 5-13: Mögliche Kraftstoffversorgung der einzelnen Fahrzeugtypen

5.4.1.1 Kraftstoffsorten

Das Simulationsmodell berücksichtigt zum einen Ottokraftstoffe aus Rohöl (gasoline from oil) und ohne Beimischungen. In Deutschland umfaßt dies die Kraftstoffsorten Benzin, Super und Super Plus.

Zum anderen bezieht das Modell schwefelfreie Dieseldieselkraftstoffe (<10ppm) aus Rohöl (diesel from oil) und den für moderne Abgasnachbehandlungssysteme erforderlichen Additiven mit ein. Beimischungen zum Dieseldieselkraftstoff (z.B. Biomasse) untersucht das Modell bei der Bestimmung der Kraftstoffverfügbarkeit.

Im deutschen Simulationsmodell wird Erdgas (natural gas) nicht nur als direkter Kraftstoff in Form des – in Deutschland gebräuchlicheren – komprimierten Methans (CNG)¹⁵⁶, sondern auch als Rohstoff für mittels Fischer-Tropsch-Synthese hergestellte Kraftstoffe GTL (Gas-to-

¹⁵⁶ Zur Alternative Auto- bzw. Flüssiggas (LPG) siehe Abschnitt 2.3.8.

Liquid) zur Verwendung in Otto- und Dieselmotoren betrachtet. Beide Verfahren ermöglichen eine Emissionssenkung im Vergleich zu Kraftstoffen aus Rohöl.

Kraftstoffe aus Biomasse (bio fuel) als vierte Kraftstoffart im Modell umfassen zum einen Biodiesel aus Rapsmethylester. Zum anderen fallen darunter auch Kraftstoffe aus Biomasse BTL (Biomass-to-Liquid), die genau wie GTL mit Hilfe der Fischer-Tropsch-Synthese hergestellt werden. Pflanzen binden in ihrem Wachstum, also in der Erzeugung von Biomasse, genauso viel Kohlendioxid wie zu einem späteren Zeitpunkt beim Gebrauch der Biokraftstoffe freigesetzt wird. Fahrzeuge, die mit reinen Biokraftstoffen getankt werden, gelten damit trotz des Verbrennungsvorgangs als CO₂-neutral. Die Kraftstoffe aus Biomasse sind im Modell stets als Beimischung zu Kraftstoffen aus Rohöl oder Erdgas zu finden, so daß sich die CO₂-Emissionen der Fahrzeugtypen proportional zum Anteil der Beimischung vermindern. Bei der Berechnung werden die höheren NO_x-Emissionen aufgrund des Einsatzes von Biodiesel nicht berücksichtigt. Zum einen ist der Anteil von Biodiesel zu Beginn des Simulationszeitraums sehr gering und zum anderen verringert der Biodieselanteil sich rasch zu Gunsten der wesentlich effizienteren, synthetischen BTL-Kraftstoffe.

Die fünfte Kraftstoffart im Modell ist Strom (current) für Elektrofahrzeuge mit Akkumulatoren. Bei der Betrachtung des gesamten Lebenszyklus fallen sämtliche Emissionen während der Stromerzeugung in den Kraftwerken an. Da die vorliegende Arbeit jedoch ausschließlich die beim Fahrbetrieb anfallenden Emissionen betrachtet, wird die Nutzung von Strom hier als emissionsfrei vorausgesetzt. Gleichzeitig gilt die Annahme einer stetigen Zunahme der Stromerzeugung aus regenerativen Energiequellen.

Wasserstoff (hydrogen) als letzte Kraftstoffart im Simulationsmodell kommt als Kraftstoff für elektrische Fahrzeuge zum Einsatz. Vergleichbar mit der Stromerzeugung ist auch hier die Gewinnung des Wasserstoffs für die Höhe der Fahrzeugemissionen ausschlaggebend. Das Modell betrachtet Brennstoffzellenfahrzeuge als emissionsfrei, da aller Voraussicht nach der zukünftige Bedarf an Wasserstoff – neben der augenblicklichen Gewinnung aus Erdgas – regenerativ (z.B. Biomasse) erzeugt wird.

5.4.1.2 Antriebsarten

Das deutsche Modell bezeichnet konventionelle Fahrzeuge mit Ottomotor mit der Indexvariable ‚gasoline‘. Neben herkömmlichem Mineralöl steht Erdgas als Gas-to-Liquid (GTL) oder Biomasse als Biomass-to-Liquid (BTL) zum Betrieb von Ottomotoren zur Verfügung. Je nach Kraftstoffart ändern sich auch die Emissionswerte der Fahrzeuge. Um die durchschnittlichen Emissionen dieses Fahrzeugtyps zu bestimmen, ist die Verfügbarkeit der drei Kraftstoffarten zu berücksichtigen. Der Durchschnittsverbrauch beträgt 8,04 l/100km [Albrecht 2005]. Der durchschnittliche Kaufpreis für konventionelle Fahrzeuge mit Ottomotor ist im Simulationsmodell in 2004 mit 21.735 EUR angesetzt [DAT 2004, S. 11ff.]. Die durchschnittliche Motorleistung beträgt 84kW [SRU 2005, S. 166].

Der Fahrzeugtyp ‚Diesel without Filter‘ steht im Simulationsmodell für Fahrzeuge mit konventionellem Dieselmotor, die keinen Partikelfilter im Abgasnachbehandlungssystem eingebaut haben. Gleichwohl sind viele Fahrzeuge ab dem Jahr 2006 nachrüstbar. Der durchschnittliche Kaufpreis für Dieselfahrzeuge liegt bei 24.150 EUR. Der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch liegt bei 6,43 l/100 km [Gibgas 2006].

Der Fahrzeugtyp ‚Diesel with Filter‘ bezeichnet Dieselfahrzeuge, die mit einem Partikelfilter im Abgasnachbehandlungssystem ausgestattet sind. Hierbei wird nicht zwischen Fahrzeugen mit serienmäßigen und nachgerüsteten Partikelfiltern unterschieden. Hinsichtlich der Partikelemissionen sind diese Fahrzeuge emissionsfrei. Gegenüber den Dieselfahrzeugen ohne Partikelfilter haben die Fahrzeuge mit Partikelfilter aufgrund des unter Abschnitt 2.3 erläuterten Regenerationsprozesses einen geringfügig höheren Kraftstoffverbrauch von 6,5 l/100 km. Infolge des zusätzlichen Partikelfilters sind die durchschnittlichen Kosten für diesen Fahrzeugtyp um 590 EUR höher und betragen 24.740 EUR im Jahr 2004 [Dudenhöfer 2005b, S. 3].

Das Simulationsmodell bezieht mit dem Fahrzeugtyp ‚Gas Engine‘ alle monovalenten Erdgasfahrzeuge mit ein. Bivalente Fahrzeuge, also Kombinationen aus Erdgas und Verbrennungsmotor berücksichtigt das Modell nicht, da diese Fahrzeuge aller Voraussicht nach lediglich eine Übergangslösung bis zur Schaffung einer ausreichend dichten Erdgasinfrastruktur darstellen. Die Fahrzeugattribute beziehen sich infolgedessen auf CNG-Fahrzeuge, deren Motoren optimal auf Verbrennung von Erdgas eingestellt sind. Die Entwicklung der Fahrzeugeigenschaft ‚Reichweite‘ ist somit stark von dem maximalen Druck abhängig, mit dem CNG-Fahrzeuge betankt werden können. Der durchschnittliche Kaufpreis berechnet sich mit einem Aufpreis von 3.500 EUR gegenüber vergleichbaren Benzinfahrzeugen auf 25.235 EUR. Der durchschnittliche Verbrauch an Erdgas beträgt 6,23 kg/100km [MOT 2004, S. 51].

Der Fahrzeugtyp ‚Hybrid Gasoline‘ bezeichnet im Simulationsmodell ein Hybridfahrzeug mit Ottomotor. Diese Fahrzeuge haben im Modell gegenüber konventionellen Fahrzeugen mit Ottomotor einen geringeren Kraftstoffverbrauch von 5,55 l/100km. Wegen des zusätzlichen technischen Aufwandes durch den Einbau eines Elektromotors im Antriebsstrang liegen die Anschaffungskosten mit 31.516 EUR für ein Hybridfahrzeug deutlich über dem Kaufpreis konventioneller Fahrzeuge [Dudenhöfer 2005b, S. 33; Hack 2004c, Naunin 2004, S. 117].

‚Hybrid Diesel‘ steht im Simulationsmodell für die sich derzeit noch in Entwicklung befindlichen Hybridfahrzeuge mit Diesellaggregat. Gegenüber dem ‚Hybrid Gasoline‘ hat dieser Fahrzeugtyp einen noch geringeren Kraftstoffverbrauch von 4,8 l/100km. Gleichwohl bestehen die gleichen Probleme hinsichtlich Stickoxid- und Partikelemissionen. Da die Kombination aus Diesel- und Elektromotor indes erst in naher Zukunft marktreif ist, werden wahrscheinlich alle Modelle mit serienmäßigem Partikelfilter ausgestattet sein. Der Kaufpreises wird mit 34.510 festgelegt, so daß die Preisdifferenz mit 3.000 EUR gegenüber dem ‚Hybrid Gasoline‘

um den gleichen Betrag höher ist wie das Verhältnis Diesel- und Benzinaggregat ohne Elektromotor.

Der Fahrzeugtyp ‚Electric Akku‘ bezeichnet im Simulationsmodell Elektrofahrzeuge mit einem oder mehreren Akkumulatoren als Energiespeicher, wobei externe Stromversorgung durch Oberleitungen, Stromschienen oder Induktionsschleifen unberücksichtigt bleibt. Die Energiezufuhr zum Laden des Akkumulators kann sowohl langwierig über Hausstromanschlüsse, als auch über Starkstrom an entsprechend ausgerüsteten Ladestationen erfolgen. Die Reichweite ist von der Entwicklung der Akkumulatorkapazität abhängig; eine Abschätzung, inwieweit sich kürzere Ladezeiten auf die Kaufentscheidung auswirken, ist indes schwierig. Zur Bestimmung des durchschnittlichen Kaufpreises wird im Simulationsmodell der Volkswagen CitySTROMer mit 20 kW Synchronmotor und Blei-Gel-Akkumulator auf Basis des Golf III herangezogen [Naunin 2004, S. 11]. Umgerechnet auf das Jahr 2004 ergibt sich ein Kaufpreis von 32.120 EUR [DAT 2004, S: 45]. Bei einer benötigten Energiemenge von 14.000 kWh [Naunin 2004, S. 34f.] sind bei einem heutigen Lithium-Ionen-Akkumulator ($3,6V \cdot 2,2Ah = 7,92kWh$) rund 1800 Zellen erforderlich [Hack 2004c]. Bei einem Preis von 10 EUR pro Zelle, betragen die Kosten des Akkumulators mit 18.000 EUR etwa die Hälfte der Gesamtkosten des Fahrzeugs. Die Reichweite beträgt damit in der Fahrzeugauslegung 100 Kilometer bei einer erreichbaren Geschwindigkeit von 100 km/h [Naunin 2004, S. 14].

‚Electric H2‘ bezeichnet im Deutschland-Modell Elektrofahrzeuge, die ihren Antriebselektromotor mit Hilfe von Brennstoffzellen versorgen. In den zugrundegelegten Leistungsdaten wird davon ausgegangen, daß ausschließlich die aus heutiger Sicht aussichtsreichste Entwicklungsplattform der PEM-Brennstoffzellen und der entsprechenden Nachfolgetechnologien zum Einsatz kommen. Fahrzeuge mit On-Board-Reformern sind aufgrund des hohen Systemaufwandes im Modell nicht berücksichtigt. Infolge dieser Annahme werden die Fahrzeuge mit Wasserstoff betankt, wobei dieses farb- und geruchlose Gas in Drucktanks an Bord des Fahrzeugs gespeichert wird. Das Modell setzt einen durchschnittlichen Verbrauch von 1 kg CH_2 /100km voraus. Zu Beginn der Simulation wird vereinfachend ein Kaufpreis von 40.000 EUR festgesetzt, wobei 18.000 EUR auf das Fahrzeug und 22.000 EUR auf die Brennstoffzellen entfallen. Bei einer Anfangsleistung des Antriebs von 60 kW ergibt sich ein Preis von 367 EUR/kWh. Gleichwohl ist die Modellierung des künftigen Kostensenkungspotentials von Brennstoffzellen weitaus wichtiger als der Kaufpreis zu Beginn der Simulation. Um einen Kaufpreis von 30.000 Euro zu erreichen, müssen die Kosten für das Brennstoffzellensystem auf 8.000 Euro reduziert werden. Mit einer prognostizierten Antriebsleistung von 105 kW im Jahr 2035 ergeben sich Kosten von 76,19 Euro pro kWh. Dieser Wert stimmt mit der erwarteten Preisentwicklung der Systemkosten in Abschnitt 2-3-7 überein.

5.4.2 Erweiterung und Anpassung der Emissionen

Das kalifornische Modell berücksichtigt ausschließlich Kohlenwasserstoffemissionen (HC) als Indikator für den Erfolg umweltpolitischer Maßnahmen [Ford 1999, S. 261; BenDor 2004, S. 11f.]. Im deutschen Modell sollen mit Hilfe der Indexvariablen (subscript) auch die vom deutschen Gesetzgeber beschränkten Emissionen (emission types) Kohlenmonoxid, Stickoxide und Partikelemissionen sowie Kohlendioxid untersucht werden (siehe Abschnitt 2.4.4 und Abbildung 5-14)

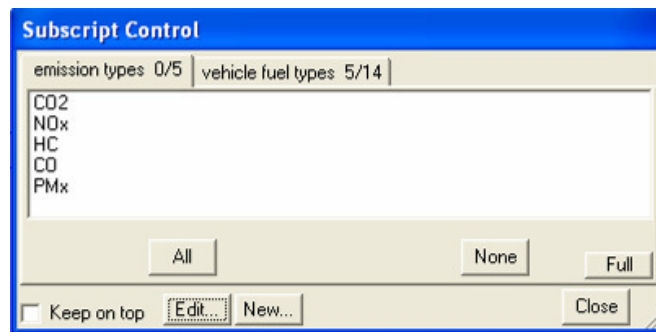


Abbildung 5-14: Indexvariable 'emission types'

Zur Bestimmung der Schadstoffemissionswerte der einzelnen Fahrzeugtypen werden die Schadstoffnormen EURO 1-5 herangezogen, da alle neu zugelassenen Fahrzeuge mindestens die Grenzwerte erfüllen müssen (siehe Abschnitt 2.4.4) [UBA 2003c]. Die CO₂-Vorgaben leiten sich aus den Vorgaben zur Kennzeichnungspflicht für Neufahrzeuge ab (siehe Abschnitt 3.3.6.3).

5.4.3 Erweiterung des Modells um eine Fahrzeugalterungskette

Alterungsketten ermöglichen für gewöhnlich die Untersuchung demographischer Strukturen in Populationen. Im Automobilsektor bilden Alterungsketten die altersabhängigen Fahrzeuglöschungsraten, die Neuzulassungen und damit die Veränderungen in der Altersstruktur des Fahrzeugbestandes ab. Dazu kann die 'scrapage aging chain' in mehrere Alterskohorten unterteilt werden, die jeweils einen in der Altersstruktur unterschiedlichen Bestand abbilden [Stermann 2000, S. 469ff.].¹⁵⁷ Der (altersbedingte) Bestand ist auch Grundlage für die Berechnung der Emissionen und des für Umweltschutzausgaben zur Verfügung stehenden Haushaltes. Das deutsche Modell unterscheidet sechs Altersklassen. Jede Altersklasse ist durch einen Speicher dargestellt und simuliert einen Zeitraum von fünf Jahren, so daß im Modell Fahrzeuge bis zu einem Alter von 30 Jahren berücksichtigt werden (siehe Abbildung 5-15):

¹⁵⁷ Im Modell von Kalifornien werden die Fahrzeuge aller Altersklassen in nur einer Alterungskohorte zusammengefaßt und nach zehn Jahren aus dem Bestand gelöscht [Ford 1999, S. 262].

Scrapage Aging Chain

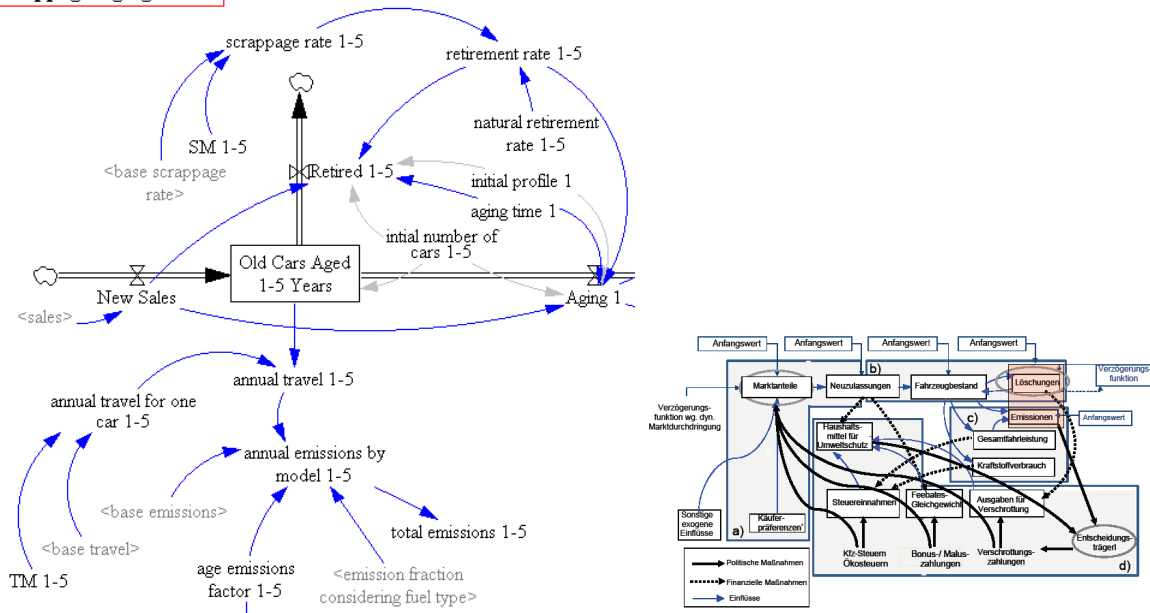


Abbildung 5-15: Detailansicht der Altersklasse für Fahrzeuge von 1 bis 5 Jahren

Zur Bestimmung der Anfangsbestände (initial numbers of cars) der einzelnen Fahrzeugtypen in den jeweiligen Speichern werden die Altersverteilung des Fahrzeugbestandes in 2004 und die aktuellen Zulassungszahlen berücksichtigt (siehe Abbildung 5-16).

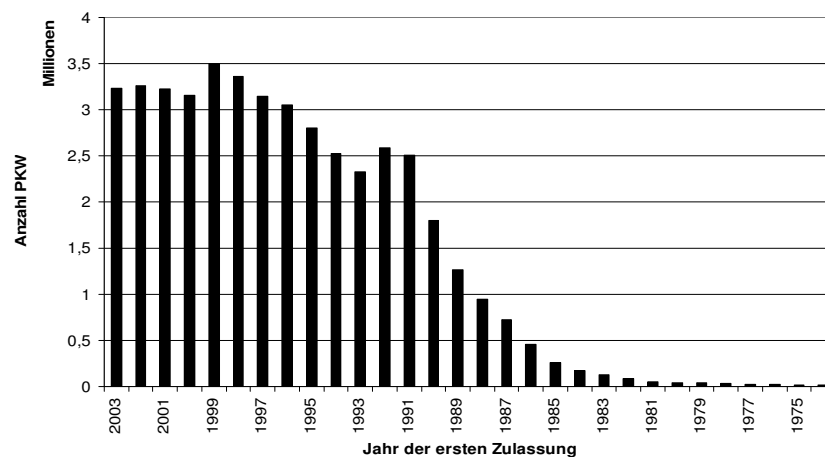


Abbildung 5-16: Altersverteilung des Fahrzeugbestandes in Deutschland 2004 [KBA 2004b, S. 137].]

In 2004 ergeben sich die in Tabelle 5-3 dargestellten Anfangsbestände der Fahrzeugtypen. Hybridfahrzeugen mit Dieselmotor sowie Brennstoffzellenfahrzeuge befinden sich noch vor der Markteinführung. Im Modell werden sie als ‚Prototypen‘ mit einem Bestand von zehn Fahrzeugen berücksichtigt.

Tabelle 5-3: PKW-Bestand nach Altersklassen und Antriebsvarianten in 2004 [KBA 2004b, S. 17, 136ff., BGW 2005, Dudenhöffer 2005b]

Altersgruppe	0-5	6-10	11-15	16-20	21-25	26-30	>30
Zulassungsjahr	2003-1999	1998-1994	1993-1989	1988-1984	1983-1979	1978-1974	vor 1973
Ottomotor	13.341.028	12.131.791	8.543.684	2.087.148	288.482	102.477	199.091
Diesel o. F.*	2.761.150	2.741.482	1.930.659	471.643	65.190	23.157	44.990
Diesel m. F.**	253.589	0	0	0	0	0	0
Erdgas	7.198	6.546	4.610	1.126	156	55	107
Hybrid Otto	5.598	5.090	3.585	876	121	43	84
Hybrid Diesel	10	0	0	0	0	0	0
Elektro (Akku)	788	717	505	123	17	6	12
Brennstoffzelle	10	0	0	0	0	0	0
Gesamt 45 Mio. = 100%	16.369.352	14.885.626	10.483.043	2.560.917	353.966	125.739	244.238

*ohne PM_x-Filter **mit PM_x-Filter [Dudenhöffer 2005b, S. 8]

Im ersten der sechs Speicher der Alterungskette (old cars aged 1-5 years) wird der Zufluß an jährlich neu verkauften Fahrzeugen (new sales) in Abhängigkeit vom jeweiligen Fahrzeugtyp durch die entsprechende Indexvariable akkumuliert und zum Anfangsbestand (initial number of cars 1-5) addiert.

(25.) *"Old Cars Aged 1-5 Years"[vehicle types] = INTEG (New Sales[vehicle types]-Aging 1[vehicle types]-"Retired 1-5"[vehicle types], "intial number of cars 1-5"[vehicle types]), mit*

(26.) $\text{INTEG}(\text{rate}, \text{initial value}) = \text{initial value} + \int \text{rate}$

Bei den nachfolgenden fünf Speichern erfolgt der Zufluß an Fahrzeugen aus dem verzögerten Alterungs(ab)fluß (aging) an Fahrzeugen aus dem jeweils vorhergehenden Speicher. Daraus ergibt sich schließlich die Alterung der Fahrzeuge in den Alterskohorten.

Neben diesem Alterungsfluß existiert für jeden Speicher eine weitere Flußvariable (retired), welche die Anzahl der stillgelegten Fahrzeuge der jeweiligen Altersklasse berechnet. Diese werden jährlich vom Fahrzeugbestand abgezogen. Die Höhe der jährlichen Stilllegungen bestimmt sich aus den natürlichen Stilllegungen ohne politische Eingriffe (natural retirement rate) und für Fahrzeuge älter als 15 Jahre zusätzlich aufgrund von ökonomischen Anreizen durch die Zahlung einer Verschrottungsprämie (scrappage rate).

Aus der Verschrottungsrate (scrappage rate) und der natürlichen Stilllegungsrate (natural retirement rate) wird eine kombinierte Löschrungsrate (retirement rate) berechnet. Hierbei erfolgt in einem ersten Schritt die Fahrzeuglöschung aufgrund von Verschrottungszahlungen, im zweiten Schritt werden vom Restbestand die stillgelegten Fahrzeuge abgezogen.

Diese kombinierte Löschrungsrate (retirement rate) muß je nach Altersklasse mit einem entsprechend korrigierten Anfangswert versehen werden, damit nicht zu Beginn der Simulation der Fahrzeugbestand drastisch reduziert wird (siehe Abbildung 5-17). Die kombinierte Lö-

schungsrate wird daher als Variable mit Anfangswert eingeführt.¹⁵⁸ Somit lautet Formel für die erste Alterklasse:

$$(27.) \text{"retirement rate 1-5"} = \text{ACTIVE INITIAL}(\text{"scrapage rate 1-5"} + (1 - \text{"scrapage rate 1-5"}) * (1 - \text{POWER}(1 - \text{"natural retirement rate 1-5"}, 5)), 0.0346174).$$

Der letzte Wert in den jeweiligen Formeln ist der gewählte Anfangswert. Dieser entspricht den ersten berechneten Werten dividiert durch einen Faktor, der experimentell so bestimmt worden ist, daß der Gesamtfahrzeugbestand im ersten Jahr nahezu konstant bleibt. Dieser Korrekturfaktor hat den Wert 3,5. Die daraus resultierenden Anfangswerte sind in Tabelle 5-4 aufgeführt.¹⁵⁹

Tabelle 5-4: Ermittelte Anfangswerte für kombinierte Löschungsrate der Alterskohorten [KBA 2003, S. 140, 339]

Alterskohorte	0-5	6-10	11-15	16-20	21-25	26-30
Anfangswert	0,0346174	0,0467443	0,120166	0,207571	0,201249	0,120627

Mit diesen Anfangswerten wird der durch den Sprung zu Beginn verursachte Fehler im Gesamtfahrzeugbestand korrigiert:

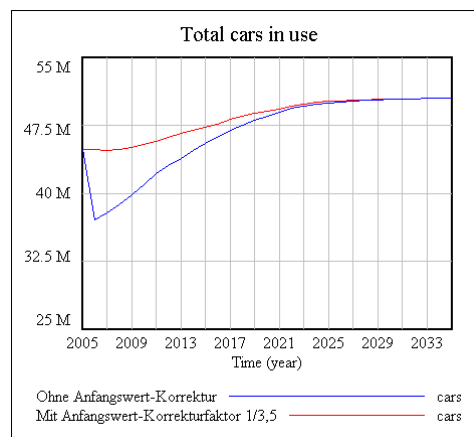


Abbildung 5-17: I Fahrzeugbestand vor und nach Korrektur der Löschungsrate-Anfangswerte

¹⁵⁸ Das Problem hierbei ist, daß zum Zeitpunkt der ersten Berechnung die Simulationssoftware VENSIM noch nicht alle Werte erzeugt hat, die sie zur Berechnung benötigt. Damit Vensim die Berechnung nicht abbricht, werden nach einem bestimmten Algorithmus Anfangswerte ermittelt und in Form einer Warnung angezeigt (Black-Box). Durch diese Anfangszahlen werden im ersten Iterationsschritt zu viele Fahrzeuge stillgelegt. Ab dem zweiten Iterationsschritt stehen Vensim die benötigten Werte zur Verfügung, so daß kein weiterer Sprung auftritt. Im Gegensatz zum Softwareprogramm kennt der Anwender jedoch den ungefähren Verlauf des Fahrzeugbestandes. Im ersten Iterationsschritt bleibt er nahezu unverändert. Infolgedessen kann der Anwender dem Softwareprogramm einen korrigierten Anfangswert vorgeben (initial value), damit der Verlauf von Beginn an stimmt.

¹⁵⁹ Die Betrachtung der einzelnen Altersklassen zeigt, daß der von Vensim errechnete Anfangswert um den gleichen Faktor variiert. Infolgedessen wird dieser Wert als ‚initial value‘ eingetragen und iterativ mit Korrekturfaktoren multipliziert beziehungsweise dividiert, bis sich der gewünschte Verlauf im ersten Iterationsschritt einstellt.

Diese nun korrigierte kombinierte Löschrungsrate zieht vom Anfangsbestand über fünf Jahre im Voraus die Anzahl beider Löschrungen ab. Dann werden jedes Jahr von den Neuzugängen zum Bestand (new sales, aging inflow) einmalig die durch den ökonomischen Anreiz stillgelegten Fahrzeuge und danach für fünf Jahre die natürlichen Stillegungen berechnet und abgezogen.

Dabei soll von dem Bestand der Neuzugänge der Anteil der natürlichen Stillegungen abgezogen und vom restlichen Bestand wiederum der Anteil der natürlichen Stillegungen abgezogen werden. Dieses Vorgehen wird für fünf Jahre wiederholt und läßt sich mit dem Bestand (B), dem prozentualen Anteil der Löschrungen (r) und einer Konstante (K=1-r) als mathematische Reihe beschreiben, die sich wie folgt für fünf Jahre vereinfachen läßt:

$$\begin{aligned}
 & B - (r \cdot B) - (B - r \cdot B) \cdot r - ((B - (r \cdot B) - (B - r \cdot B) \cdot r) \cdot r - \dots \\
 & = B[1 - r - (1 - r) \cdot r - ((1 - r) - (1 - r) \cdot r) \cdot r - \dots] = B[K - K \cdot r - ((K) - (K) \cdot r) \cdot r - \dots] \\
 (28.) & = B[K - K \cdot r - (K(1 - r) \cdot r - \dots)] = B[K - K \cdot r - K^2 \cdot r - K^3 \cdot r - K^4 \cdot r] \\
 & = B[K(1 - r) - K^2 \cdot r - K^3 \cdot r - K^4 \cdot r] = \dots = BK^5 = B(1 - r)^5
 \end{aligned}$$

Die kombinierte Stillegungsrate berechnet sich damit für den ersten Speicher zu

$$(29.) \text{ "retirement rate 1-5" = "scrappage rate 1-5" + (1 - "scrappage rate 1-5") * (1 - POWER(1 - "natural retirement rate 1-5", 5)) mit}$$

$$(30.) \text{ POWER}(X, Y) = X^Y$$

Diese kombinierte Löschrungsrate kann nun für die Berechnung der gesamten Löschrungen aus dem Bestand der ersten fünf Jahre (retired 1-5) eingesetzt werden.

$$(31.) \text{ "Retired 1-5"[vehicle types] = DELAY CONVEYOR(New Sales[vehicle types]*("retirement rate 1-5"), 0, initial profile 1, "initial number of cars 1-5"[vehicle types]*("retirement rate 1-5"), 0, mit}$$

$$(32.) \text{ DELAY CONVEYOR(input, ctime, leak, initprofile, inittot, initctime)}$$

Dabei gibt die Verzögerungsfunktion DELAY CONVEYOR den Eingangswert (input = Neuzulassungen) nach einer Verzögerungszeit (ctime = 5 Jahre) wieder aus. Solange sich Material in der Verzögerungsschleife befindet, wird dieses um die Verlustrate (leak = 0) pro Zeiteinheit verringert. Der Anfangswert des in der Funktion befindlichen Materials (inittot = Anfangsbestand) wird abhängig von einem in Form einer Lookup-Variablen vorgegebenen Profil (initprofile) verteilt. Ist ,initprofile' linear und ,initctime' ungleich Null, so ergibt sich eine gleichmäßige Verteilung des Anfangswerts aus ,inittot' / ,initctime' pro Periode. Ist ,initctime' gleich Null, so wird ,inittot' nach Ablauf der ersten Periode ausgegeben.

Nachdem nun die Stillegungen aus dem Bestand berücksichtigt sind, darf von dem Altersfluß (aging 1) nur noch der verbliebene Restbestand nach fünf Jahren weitergegeben werden. Daher wird in der ansonsten analogen Verzögerungsfunktion die Löschrungsrate (,retirement

rate') durch den Restwert der Löschrungsrate (1-retirement rate) ersetzt und die Verzögerungszeiten (ctime, initctime) auf 5 Jahre (aging time 1) gesetzt.

$$(33.) \text{ Aging } I[\text{vehicle types}] = \text{DELAY CONVEYOR}(\text{New Sales}[\text{vehicle types}] * (1 - \text{"retirement rate 1-5"}), \text{aging time 1}, 0, \text{initial profile 1}, \text{"initial number of cars 1-5"}[\text{vehicle types}] * (1 - \text{"retirement rate 1-5"}), \text{aging time 1})$$

Zur differenzierten Berechnung der altersabhängigen Emissionen werden die Fahrzeugbestände in den einzelnen Speichern berücksichtigt. Dies geschieht mit Hilfe entsprechender Altersanpassungsfaktoren (Age Emission Factor, AEF). Unter der Annahme, daß die Fahrzeuge den zum Zeitpunkt ihrer Erstzulassung geltenden Abgasnormen entsprechen, berechnen sich diese Faktoren gemäß Tabelle 5-5. Hierdurch werden im Modell die als ordnungspolitische Instrument wirkenden EURO-Abgasnormen (siehe Abschnitt 2.4.4) integriert.

Die Altersanpassungsfaktoren (AEF) ergeben sich aus der prozentualen Reduktion der Emissionen für die einzelnen Schadstoffe gegenüber dem jeweiligen Referenzwert. Anschließend werden die jährlichen Emissionen für die Fahrzeugtypen (annual emissions by model) berechnet. Dies geschieht durch Multiplikation der Altersanpassungsfaktoren mit der jährlichen fahrzeugtypspezifischen Gesamtfahrleistung (annual travel), den normierten Emissionen in Megatonnen pro km (base emissions) und dem Anteil der verschiedenen Antriebsstrategien an den normierten Emissionen (emission fraction considering fuel type).

Die gesamten Emissionen der Fahrzeuge dieser Altersklasse (z.B. total emissions 1-5) ergeben sich aus der Summe der jeweiligen Emissionen über alle Fahrzeugtypen.

Tabelle 5-5: Anpassungsfaktoren für altersbedingte Emissionssteigerungen verschiedener Luftschadstoffe [UBA 2003c, UBA 2003e, Shell 2004, S. 37]

AEF	CO	HC + NO _x	PM	CO ₂
1-5	1,17	0,77	0,53	0,99
6-10	1,48	1,45	1,08	1,02
11-15	2,05	2,20	1,50	1,06
16-20	2,88	3,27	2,54	1,08
21-25	4,43	5,06	4,12	1,10
26-30	6,59	7,79	6,49	1,17

Die Addition aller Emissionen der Altersklassen ergibt die gesamte Emissionsbelastung durch den Fahrzeugbestand (total emissions 1-30). Somit berechnen sich beispielsweise die spezifischen CO₂-Emissionen für ein neues konventionelles Ottomotorfahrzeug mit einem Verbrauch von 8,04 l/100 km * 0,99 = 7,9596 l/100 km mit einer CO₂-Intensität (Umrechnungsfaktor) von 2,36 kg CO₂/l Benzinkraftstoff [Albrecht 2005] zu 187,84 g CO₂/100 km.

5.4.4 Bestimmung der jährlichen Neuzulassungen

Die Bestimmung der Neuzulassungen erfolgt im Modul 'Total Sales Calculation' (siehe Abbildung 5-18). Hier wird die Gesamtanzahl der jährlichen Neuzulassungen (total sales) aus

den Neuzulassungen am Beginn der Simulation (initial sales) und der jährlichen Wachstumsrate (growth fraction) bestimmt.

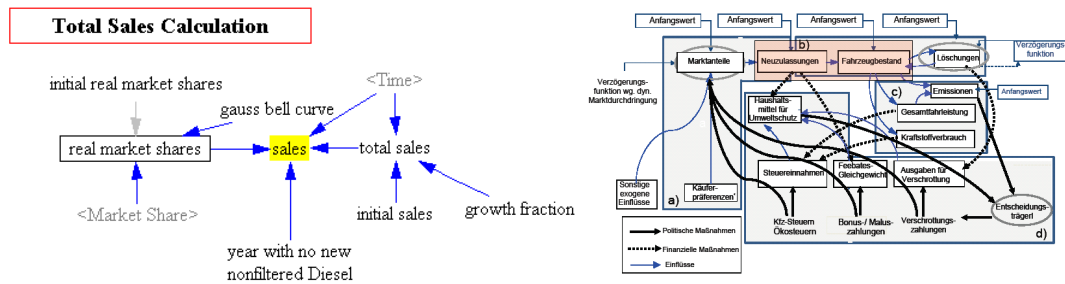


Abbildung 5-18: Struktur des Fahrzeugabsatzes

Im Jahr 2004 hat das Kraftfahrtbundesamt in Deutschland 3,24 Millionen Neuzulassungen (initial sales) registriert [KBA 2004a, S.62]. Entsprechend der Prognosen für die zukünftige (nichtlineare) Entwicklung der Zulassungszahlen werden die Werte des Jahres 2004 mit Hilfe einer Lookup-Variablen für die kommenden Jahre bestimmt (siehe Abbildung 5-19) [IFMO 2005, S.31; IFEU 2004, S. 31].

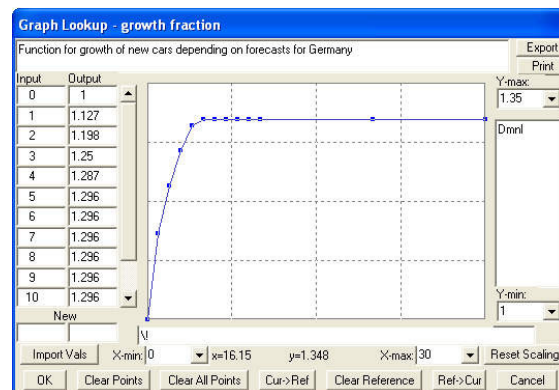


Abbildung 5-19: Lookup-Variable zur Bestimmung der jährlichen Neuzulassungen in Deutschland

Damit erfolgt die Bestimmung der jährlichen Neuzulassungen (total sales) abhängig vom Startzeitpunkt 2004 (initial sales) und der jährlichen Wachstumsrate nach der Gleichung:

$$(34.) \text{ total sales} = (\text{growth fraction}(\text{Time}-2005)) * \text{initial sales}$$

Diese Gesamtanzahl der Neuzulassungen wird nun mit Hilfe der ‚realen Marktanteileberechnungen für Neuverkäufe‘ auf die einzelnen Fahrzeugtypen aufgeteilt. Die realen Marktanteile für Neuverkäufe berücksichtigen im Gegensatz zu den mit dem MNL-Modell berechneten Marktanteilen die – in der Realität sichtbaren – dynamischen Marktdurchdringungsprozesse bei Neuentwicklungen. Dies bedeutet, daß sich Änderungen von Fahrzeugattributen nicht sofort in einem veränderten Käuferverhalten widerspiegeln, sondern mit einer gewissen zeitli-

chen Verzögerung eintreten.¹⁶⁰ Für Marktdurchdringungsprozesse werden üblicherweise logistische, oder s-förmige Trendfunktionen angewendet. Im Modell werden diese Prozesse daher mit Hilfe einer logistischen Verzögerungsfunktion mit Profil abgebildet, so daß daraus die gewünschte s-förmige Wachstumsfunktion resultiert [Kirkwood 1998, S.34; Sterman 2000, S.275ff.].

(35.) *real market shares[vehicle types] = DELAY PROFILE(logistical delay function, Market Share[vehicle types],5,initial real market shares[vehicle types],0), mit*

(36.) *DELAY PROFILE(profile, input, delay time, init, init grow)*

Die in Abbildung 5-20 dargestellte Lookup-Funktion liefert nach einer Verzögerungszeit für die Eingangswerte die nach der Profilfunktion verteilten Outputwerte.

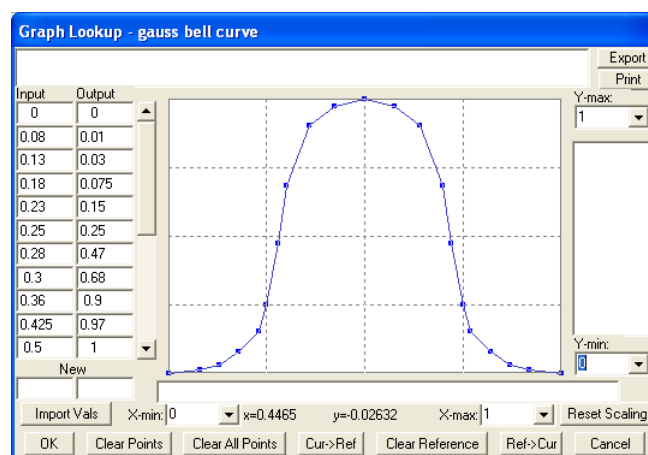


Abbildung 5-20: Erste Ableitung der s-förmigen logistischen Funktion

Die Anfangswerte der realen Marktanteile für Neuverkäufe finden sich in Tabelle 5-6 gemäß den Neuzulassungen in 2003. Die Ausgabe erfolgt nach einer Verzögerungszeit von fünf Jahren.

Tabelle 5-6: Anfangswerte der realen Marktanteile für Neuverkäufe gemäß der Neuzulassungen 2003 gegliedert nach Antriebsarten [KBA 2003, S. 113; Dudenhöffer 2005b, S. 8]

Antriebs-Art	Gasoline	Diesel o. Filter	Diesel m. Filter	Erdgas	Hybrid-Otto	Hybrid-Diesel	Elektro Akku	Elektro H2
Marktanteil	0,599	0,3591	0,0399	0,00107	0,0053	0,0003	1 e-005	1 e-005

Aufgrund der mathematischen Formulierung dürfen die Anfangswerte nicht Null sein. Die Anfangswerte berücksichtigen die voneinander abweichende Marktreife. Aufgrund des Entwicklungsstandes erreichen Dieselhybridfahrzeuge (0,0003) nennenswerte Stückzahlen zu einem wesentlich früheren Zeitpunkt als Elektrofahrzeuge(0,00001). Hybridantriebe aus Diesellaggregat und Elektromotor kombinieren lediglich einen vorhandenen Dieselmotor mit ei-

¹⁶⁰ Das kalifornische Modell vernachlässigt zeitliche Verzögerung, so daß beispielsweise bei Elektrofahrzeugen eine Erhöhung von Leistung und Reichweite bei gleichzeitiger Senkung des Kaufpreises *sofort* zu einem sprunghaften Anstieg der Absatzzahlen führt.

nem bestehenden Elektroantrieb, während bei Elektrofahrzeugen vor allem leistungsfähige Akkumulatoren beziehungsweise Brennstoffzellen noch bis zur Großserienreife entwickelt werden müssen. Das Modell setzt mit den Marktanteilen (sehr nahe bei Null) die heutigen Prognosen für die jeweilige Markteinführung um.

5.4.5 Käuferpräferenzen in Deutschland

Um das Modell auf den deutschen Markt mit SI-Einheiten übertragen zu können, müssen die Koeffizienten entsprechend angepaßt werden, da sie sowohl von der Differenz, als auch von den Absolutwerten der Eingangsgrößen abhängig sind. Gleichzeitig wird die Wertigkeit der einzelnen Fahrzeugeigenschaften auf das Käuferverhalten an die Präferenzen deutscher Autokäufer angepaßt [Stern 2003, S.23f.]. Bei der Bewertung der Betriebskosten wird, neben der bisherigen Berücksichtigung der Treibstoffkosten, ein weiterer Koeffizient zur Berücksichtigung der veränderten Kostenstruktur nach einer Umstellung der Kraftfahrzeugsteuer auf eine CO₂-Emissionsbasis hinzugefügt. Die Berücksichtigung der Emissionen bei der Kaufentscheidung basiert nun auf den CO₂-Emissionen der jeweiligen Antriebsstrategie, die gemäß der Kennzeichnungspflicht ausgewiesen werden müssen [SRU 2005, S.170]. Die neuen Koeffizienten sind in Tabelle 5-2 dargestellt.

Tabelle 5-7: Koeffizienten der Nutzenfunktion

Fahrzeugattribut	Nr.	Koeffizient
purchase price (1000\$)	1	-0,2
fuel cost (cents/ mile)	2a	-0,4
vehicle tax (cent/ gCO ₂ per km)	2b	-0,3
range (100 miles)	3a	1,279
range ² (100 miles) ²	3b	-0,117
emission level (fraction of current)	4a	-2
emission level ² (fraction of current) ²	4b	1,8
fuel availability (fraction of stations)	5a	2,24
fuel availability ² (fraction of stations) ²	5b	-0,956
horsepower (PS)	6	0,01083

Der so bestimmte Marktanteil fließt nach der in Abschnitt 5.3.2 erläuterten Struktur nun in die Berechnung der Neuverkäufe ein.

Um die Entwicklung der Emissionsbelastung durch den Individualverkehr zu beeinflussen, muß die Zusammensetzung des Fahrzeugbestandes verändert werden. Dies geschieht über die Beeinflussung des Verkaufs von Neufahrzeugen. Wichtige Kriterien für den Neuwagenkauf sind vor allem der Kraftstoffverbrauch und der Kaufpreis [DAT 2004, S. 16]. Nach einer Studie der Bauer Verlagsgruppe (Verbraucheranalyse 2004) und des Magazins Stern (Markenprofile 10) halten die deutschen Verbraucher einen geringen Kraftstoffverbrauch (62 bzw. 43 Prozent) und einen niedrigen Kaufpreis (44 bzw. 26 Prozent) für wichtig. Ein geringerer Anteil der Befragten in der Verbraucheranalyse hält Umweltfreundlichkeit (27,5 Prozent) und eine hohe Motorleistung (23 Prozent) für wichtig (siehe Abbildung 5-21) [Bauer 2004, S. 9, 167ff.; Stern 2003, S. 18]. Eine Untersuchung der Unternehmensberatung 'Oliver Wyman

(ehemals Mercer Management Consulting)' bestätigt die Ergebnisse zur Umweltfreundlichkeit [Automobilwoche 2007, S. 32].

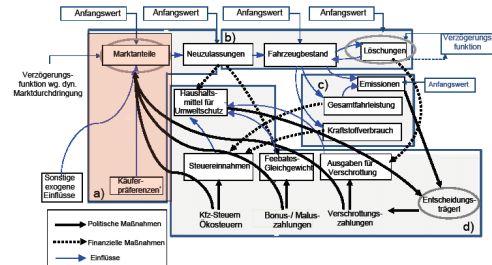
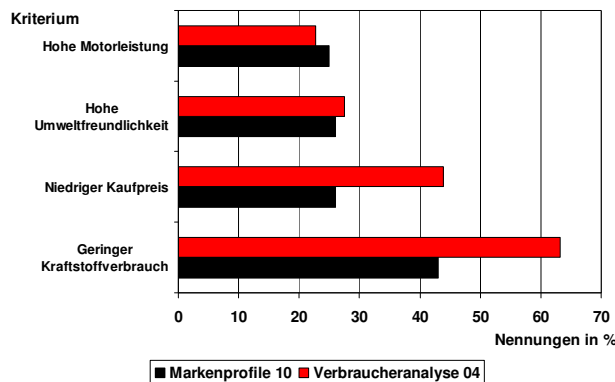


Abbildung 5-21: Käuferpräferenzen für den Neuwagenkauf in Deutschland [Eigene Darstellung nach Bauer 2004, S. 173; Stern 2003, S. 23f.]

Wie aus Tabelle 5-7 hervorgeht, ist im kalifornischen Modell der Preis das wichtigste Kaufkriterium. Die in Kalifornien durchgeführte Studie ist zwar (quantitativ) nicht mit den deutschen Befragungen vergleichbar. Gleichwohl lassen sich qualitative Tendenzen der voneinander abweichenden Käuferpräferenzen beobachten.

Tabelle 5-8: Käuferpräferenz der Fahrzeugeigenschaften [Eigene Berechnungen nach Bunch 1992, S. 25; Ford 1999, S. 265f.; Bauer 2004, S. 173; Stern 2003, S. 23f.]

	Käuferpräferenz (USA)	Rangfolge (USA)	Rangfolge (Dtschl.)
Kaufpreis	3,2	1	2
Reichweite	2,9	2	-
Umweltfreundlichkeit	1,1	3	3
Kraftstoffverfügbarkeit	0,9	4	-
Kraftstoffkosten	0,7	5	1
durchschnittl. Motorleistung	0,6	6	4
"- "= nicht erhoben			

Die deutschen Verbraucher bevorzugen vor allem Fahrzeuge mit niedrigem Kraftstoffverbrauch und damit – bei relativ konstanten Kraftstoffpreisen – geringen Kraftstoffkosten. Darüber hinaus ist der Kaufpreis ein entscheidendes Kriterium beim Neuwagenkauf. Es folgen auf Rang drei und vier nichtmonetäre Kriterien wie Umweltfreundlichkeit und Motorleistung. Reichweite und Kraftstoffverfügbarkeit sind in den deutschen Studien nicht berücksichtigt.

5.4.6 Anpassung der Fahrzeugeigenschaften

Zur weiteren Untersuchung sind die Veränderungen der Fahrzeugeigenschaften im Zuge des technischen Fortschritts zu berücksichtigen. Hierzu werden die modellierten Fahrzeugattribute dynamisch angepaßt. Die Veränderungen können je nach Fahrzeugattribut vom Entwicklungsstand der verschiedenen Antriebsstrategien, von der Zusammensetzung der angebotenen Kraftstoffe oder auch von beidem gleichzeitig abhängen. Die Ursachen dieser Veränderungen beruhen auf verschiedenen exogenen Einflüssen. Diese sind hauptsächlich technologischer

Natur, hängen teilweise aber auch von sozialen und ökonomischen Umstrukturierungen ab [Milling und Maier 1996, S. 22ff.].

So ist die Kraftstoffpreisentwicklung nicht nur durch die Knappheit der Ressourcen bestimmt, sondern auch von der internationalen politischen Lage abhängig. Die Kraftstoffzusammensetzung wird sowohl von technischen als auch von ökonomischen und politischen Rahmenbedingungen abhängig sein. Die Entwicklung der durchschnittlichen Motorleistung wird bei konventionellen Antriebsstrategien im wesentlichen nicht durch die technische Umsetzbarkeit bestimmt, sondern durch das Käuferverhalten bei der Auswahl eines geeigneten Fahrzeuges. In den folgenden Abschnitten werden die zeitlich veränderlichen Fahrzeugattribute erläutert, durch welche die Fahrzeugeigenschaften angepaßt werden.

5.4.6.1 Dynamische Kaufpreisentwicklung

Im Modul ‚purchase price calculation‘ (siehe Abbildung 5-22) wird der mittlere Kaufpreis für die spezifischen Fahrzeugtypen im Modell berechnet.

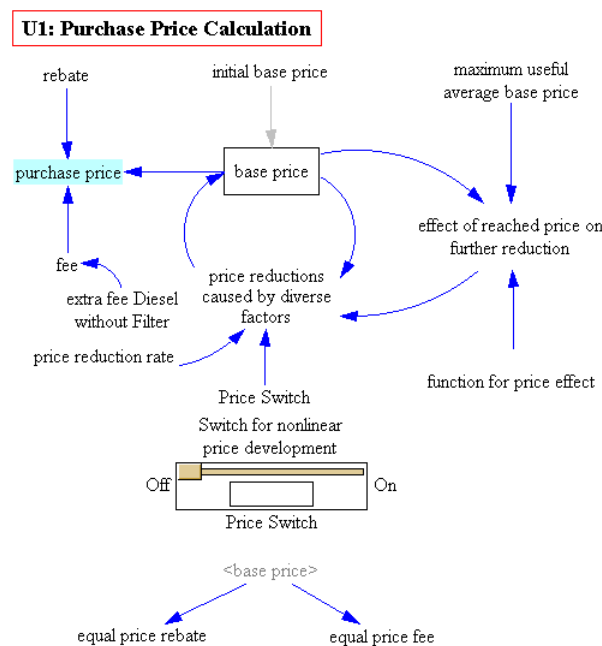


Abbildung 5-22: Fahrzeugattribut Kaufpreis

Die Entwicklung des Kaufpreises beruht auf Skaleneffekten und der Wettbewerbssituation im Automobilsektor. Beides führt zu einer Senkung der Kaufpreise. Vor allem technische Weiterentwicklungen bei den alternativen Antriebskonzepten können Einsparungen bei der Fahrzeugproduktion bewirken und Kaufpreissenkungen herbeiführen. Daher ist bei den bisher kaum auf dem Markt vertretenen Antriebskonzepten mit langfristigen Senkungen der Kaufpreise relativ zu denen der konventionellen Fahrzeuge zu rechnen. Bei diesen sind die Potentiale zur Kostensenkung weitestgehend ausgereizt. Vielmehr ist wegen der immer aufwendigeren technischen Ausstattung der herkömmlichen Fahrzeuge ein kontinuierliches Ansteigen der Kaufpreise zu erwarten. Im Modell wird daher simuliert, daß alle Fahrzeugtypen sich im

Laufe der Zeit an einen durchschnittlichen Kaufpreis von 30.000 Euro als Zielwert (maximum useful average base price) angleichen. Diese Angleichung wird jedoch auch im Jahr 2035 noch nicht erreicht sein. Ausgangswert der Kaufpreisentwicklung stellen die jeweiligen durchschnittlichen Kaufpreise der Fahrzeugtypen im Jahr 2004 dar, welche in Tabelle 5-8 noch einmal zusammengefaßt sind.

Tabelle 5-9: Durchschnittliche Kaufpreise in EUR der Fahrzeugtypen im Jahr 2004 [DAT 2004, S. 11ff., 45; BGW 2005]

Antriebs-Art	Otto	Diesel o. Filter	Diesel m. Filter	Erdgas	Hybrid-Otto	Hybrid-Diesel	Elektro Akku	Elektro H2
durchschnittl. Kaufpreis	21.735	24.150	24.740	25.235	31.516	34.516	36.000	40.000

Bei der Berechnung des Kaufpreises ändert sich der Grundpreis (base price) durch die Faktoren der Preisreduzierungsrate (price reduction rate), welche 0,3 (0,45 für Brennstoffzellenfahrzeuge) betragen.

$$(37.) \text{ base price[vehicle types]} = \text{INTEG}(-\text{price reductions caused by diverse factors[vehicle types], initial base price[vehicle types]}).$$

Mit Hilfe der Variablen ‚price reduction caused by diverse factors‘ erfolgt die Anpassung des Preises an den Zielwert:

$$(38.) \text{ price reductions caused by diverse factors[vehicle types]} = \text{price reduction rate[vehicle types]} * \text{effect of reached price on further reduction[vehicle types]} * \text{base price[vehicle types]} * \text{Price Switch}.$$

Eine zusätzliche Schleife erreicht eine langsame Annäherung an den vorher festgelegten Zielwert:

$$(39.) \text{ effect of reached price on further reduction[vehicle types]} = \text{function for price effect[vehicle types]}((\text{base price[vehicle types]} - \text{maximum useful average base price[vehicle types]}) / \text{maximum useful average base price[vehicle types]})$$

Die Verminderung der Anpassungsgeschwindigkeit erfolgt hierbei durch die Variable ‚function for price effect‘, die einer nichtlinearen Lookup-Funktion entspricht. Diese Lookup-Funktion gibt für lineare Eingangswerte eine exponentiell verlaufende Funktion aus (Abbildung 5-23).

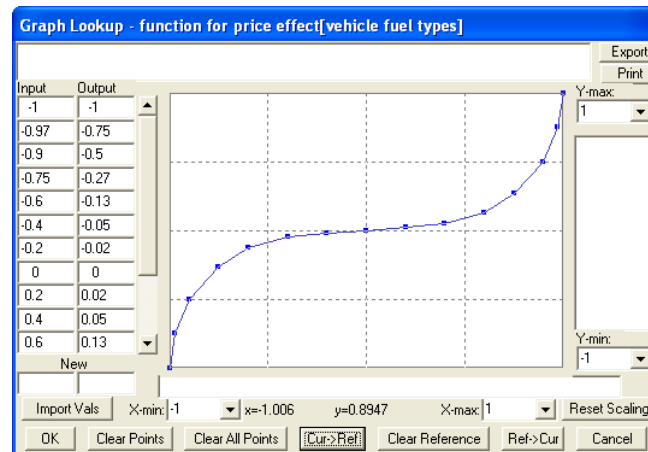


Abbildung 5-23: Lookup-Funktion zur nichtlinearen Fahrzeugpreisanpassung

Die dynamische Veränderung der Kaufpreisentwicklung kann bei Bedarf über einen Schalter, der binären Gaming-Variable ‚price switch‘, abgestellt werden. Auf den Grundpreis (base price) werden nun noch die jeweiligen Bonus- und Maluszahlen hinzugefügt, wodurch der Verkaufspreis („purchase price“) für den Endverbraucher bestimmt wird.

$$(40.) \text{ purchase price[vehicle types]} = \text{base price[vehicle types]} + \text{fee[vehicle types]} - \text{rebate[vehicle types]}$$

Dieser wird an das Marktanteilsmodell übergeben.

5.4.6.2 Kraftstoffkosten und Verbrauchsberechnung

Zur Berechnung der fahrzeugtypspezifischen Kraftstoffkosten pro Kilometer muß zunächst der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch ermittelt werden. Dies geschieht in Modul ‚U2 (b)‘, das in Abbildung 5-24 dargestellt ist. Die Struktur zur Berechnung des Verbrauchs ist weitgehend identisch mit dem Aufbau zur Berechnung der dynamischen Kaufpreisentwicklung. Die Struktur gilt auch für die dynamischen Berechnungen der anderen Fahrzeugattribute, so daß im folgenden nur noch auf die Anpassungen der die Entwicklung beeinflussenden Eingangsgrößen eingegangen wird.

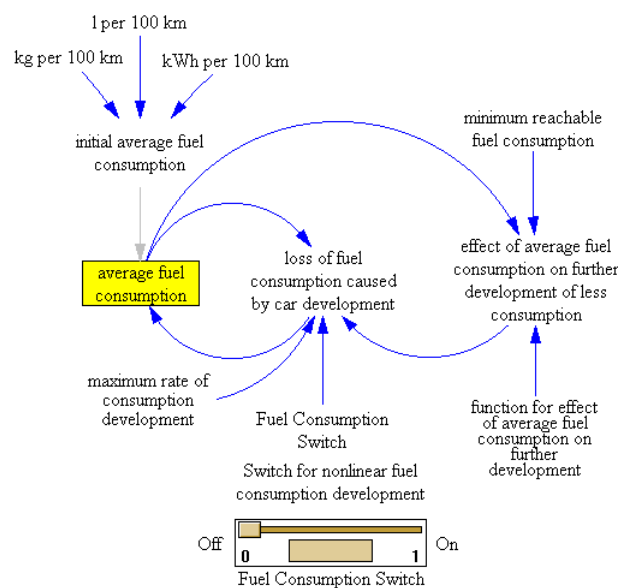
U2 (b): Fuel Consumption Calculation

Abbildung 5-24: Berechnung der Verbrauchsentwicklung

Die Variable ‚initial average fuel consumption‘ berücksichtigt zunächst den aktuellen Durchschnittsverbrauch der Fahrzeugtypen. Hierbei erfolgt die Eingabe je nach Kraftstoffstrategie in Litern, kg oder kWh pro 100 km. Die Anpassungsfaktoren des minimal realisierbaren Kraftstoffverbrauchs (minimum reachable fuel consumption) und der maximalen Rate der Verbrauchsentwicklung (maximum rate of consumption development) werden so angepaßt, daß die resultierende Verbrauchsentwicklung den Prognosen entsprechen [SRU 2005, S.160ff]. Die modellierte Verbrauchsentwicklung ist in Tabelle 5-9 dargestellt. Die Berücksichtigung der Verbrauchsentwicklung in der Simulation kann bei Bedarf mit einem Schalter ausgeschaltet werden.

Tabelle 5-10: Entwicklung des Durchschnittsverbrauchs der Fahrzeugtypen pro 100 km [SRU 2005, S.160ff; DAT 2004, S. 11ff., 45; 50]

Jahr	Otto	Diesel	Erdgas	Hybrid Otto	Hybrid Diesel	Elektro Akku	Elektro H2
2005	8,04	6,5	6,23	5,550	4,8	25	1
2010	7,053	5,642	5,338	5,262	4,425	24,39	0,9756
2015	6,292	4,991	4,684	5,014	4,133	23,82	0,9530
2020	5,704	4,488	4,179	4,799	3,889	23,29	0,9319
2025	5,250	4,099	3,789	4,614	3,677	22,80	0,9122
2030	4,898	3,799	3,488	4,455	3,495	22,34	0,8939
2035	4,605	3,561	3,255	4,317	3,337	21,92	0,8768

Der so bestimmte Verbrauch fließt in die Berechnung der spezifischen Kraftstoffkosten pro Kilometer ein. Diese werden im Modul ‚U2 (a)‘ berechnet (siehe Abbildung 5-25).

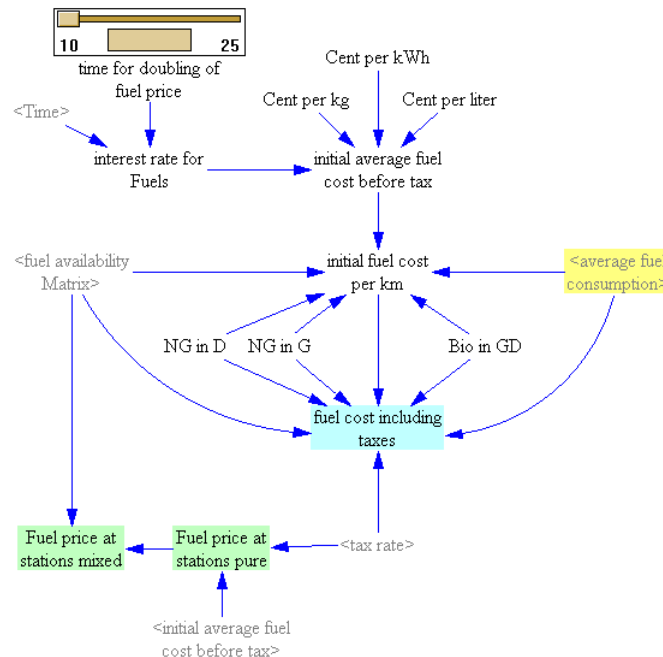
U2 (a): Fuel Cost Calculation

Abbildung 5-25: Berechnung der spezifischen Kraftstoffkosten

Zunächst werden die Wareneinstandspreise der Kraftstoffe (initial average fuel cost before tax) betrachtet. Ausgehend von den aktuellen Preisen wird je nach Kraftstoffart eine jährliche Preisentwicklungsrate (interest rate for fuels) berücksichtigt, deren Verlauf später (in Abschnitt 5.4.8.1) erläutert wird. Nun werden die spezifischen Kraftstoffkosten pro Kilometer für jeden Fahrzeugtyp berechnet. Hierbei fließen über die Matrix der Kraftstoffzusammensetzungen (fuel availability matrix) neben den Verbrauchswerten auch die Kraftstoffstrategien in die Berechnung mit ein. Exemplarisch wird an dieser Stelle die Formel für Fahrzeuge mit Ottomotor erläutert. Der aktuelle Wareneinstandspreis der im Fahrzeuge einsetzbaren Kraftstoffe (initial average fuel cost before tax) wird mit dem spezifischen Verbrauch des Fahrzeuges (average fuel consumption) multipliziert. Jeder Summand wird nun mit dem entsprechenden Faktor aus der Matrix der Kraftstoffzusammensetzungen (fuel availability matrix) multipliziert. Da die Zeilensumme aller Faktoren dieser Matrix immer eins ergibt (Benzin: aus Rohöl + aus Erdgas + aus Bio = 1), kann dieser Faktor als prozentualer Anteil einer Kraftstoffart an dem für dieses Fahrzeug verfügbaren Kraftstoff-Mix (Kraftstoffstrategie) interpretiert werden. Da die Kraftstoffpreise in Cent angegeben sind, werden sie noch mit dem Faktor 0,01 in Euro umgewandelt.

$$\begin{aligned}
 (41.) \text{ initial fuel cost per km[Gasoline]} = & \text{ initial average fuel cost before tax[Gasoline from oil]} \\
 & * \text{ average fuel consumption[Gasoline]} * \text{ fuel availability Matrix[Gasoline, Gasoline from oil]} * 0.01 \\
 & + \text{ initial average fuel cost before tax[Natural Gas]} * \text{ average fuel consumption[Gasoline]} * \text{ fuel availability Matrix[Gasoline, Natural Gas]} * 0.01 * \text{ NG in G} \\
 & + \text{ initial average fuel cost before tax[Bio]} * \text{ average fuel consumption[Gasoline]} * \text{ fuel availability Matrix[Gasoline, Bio]} * 0.01 * \text{ Bio in GD}
 \end{aligned}$$

$$\text{tax[Bio Fuel]} * \text{average fuel consumption[Gasoline]} * \text{fuel availability Matrix[Gasoline,Bio Fuel]} * 0.01 * \text{Bio in GD}$$

Der Faktor ‚NG in G‘ berücksichtigt, daß die Energiemenge in einem Kilogramm Erdgas äquivalent zu der in 1,5 Litern Ottokraftstoff ist, während ‚NG in D‘ diese Eigenschaft mit dem Faktor 1,3 für Dieselmotorkraftstoff berücksichtigt [Gibgas 2006]. Da das Erdgas in Form von GTL-Kraftstoff beigemischt wird, muß dies bei der Berechnung der Kraftstoffpreise berücksichtigt werden. Die gleiche Funktion erfüllt der Faktor ‚Bio in GD‘ für die BTL-Kraftstoffe. Vereinfachend wird jedoch davon ausgegangen, daß der Energiegehalt von Biokraftstoffen und Kraftstoffen aus Erdöl identisch ist. Daher erhält dieser Faktor den Wert eins.

Die spezifischen Kraftstoffkosten pro Kilometer inklusive Steuern (fuel cost including taxes) berechnen sich aus den soeben berechneten Kosten plus den Steuersätzen (tax rate). Dabei werden auf identische Weise die Anteile der Kraftstoffarten gemäß der Kraftstoffstrategie berücksichtigt. Exemplarisch wird wieder die Formel für Fahrzeuge mit Ottomotor dargestellt.

$$(42.) \text{ fuel cost including taxes[Gasoline]} = \text{initial fuel cost per km[Gasoline]} + (\text{tax rate[Gasoline from oil]} * \text{average fuel consumption[Gasoline]} * 0.01) * \text{fuel availability Matrix[Gasoline, Gasoline from oil]} + (\text{tax rate[Natural Gas]} * \text{average fuel consumption[Gasoline]} * 0.01) * \text{fuel availability Matrix[Gasoline, Natural Gas]} * \text{NG in G} + (\text{tax rate[Bio Fuel]} * \text{average fuel consumption[Gasoline]} * 0.01) * \text{fuel availability Matrix[Gasoline, Bio Fuel]} * \text{Bio in GD}.$$

Um ein besseres Verständnis für die Kraftstoffpreisentwicklung bei der Umsetzung der Kraftstoffstrategien zu bekommen, werden zudem noch die Abgabepreise der Kraftstoffe an den Endverbraucher (fuel price at stations) berechnet. Hierbei wird zwischen den Kosten bei unvermishtem Kraftstoffangebot (pure) und den resultierenden Kosten bei einer Kraftstoffmischung entsprechend der angewandten Kraftstoffstrategie (mixed) unterschieden.

5.4.6.3 Reichweitenberechnung

Die in Abbildung 5-26 dargestellte Struktur zur dynamischen Berechnung der Reichweite ist ebenfalls identisch mit derjenigen zur Berechnung der dynamischen Kaufpreisentwicklung. Die durchschnittlichen Reichweiten entwickeln sich dabei je nach Antriebsstrategie sehr unterschiedlich.

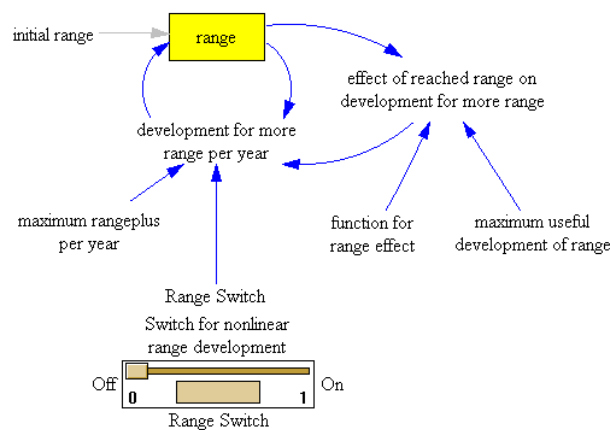
U3: Range Calculation

Abbildung 5-26: Berechnung der dynamischen Reichweitenentwicklung

Bei den konventionellen Fahrzeugtypen und den Hybridantrieben treten Verbesserungen der Reichweite hauptsächlich durch verbesserte Kraftstoffverbrauchswerte auf, aber auch durch den Einbau vergrößerter Kraftstofftanks. Die sinnvolle Obergrenze der Reichweitenentwicklung (maximum useful development of range) für diese Fahrzeuge wird bei 1200 km pro Tankfüllung angesiedelt. Eine Verdopplung der Reichweite während des Simulationszeitraumes wird bei den Erdgasfahrzeugen fast erreicht. Dies wird hauptsächlich durch eine Erhöhung des Speicherdruckes von 200 bar auf 400 bar ermöglicht, da entsprechende Drucktanks entwickelt werden, welche auch insgesamt kleinere Außenmaße haben. Bei den Elektrofahrzeugen mit Akkumulator wird die Reichweite vervierfacht. Hierbei wird zunächst davon ausgegangen, daß durch den Einsatz neuester Akkutechnologie und einer optimierten Fahrzeugkonstruktion für den reinen Elektroantrieb über eine Gewichtsreduzierung eine zügige Verdoppelung der Reichweiten erreicht wird. Die weitere Reichweitensteigung wird durch die stetigen Verbesserungen der Akkutechnologie erreicht. Bei den Elektrofahrzeugen mit Brennstoffzelle wirken sich sowohl die Fortschritte bei der Drucktankentwicklung als auch bei der Optimierung der Fahrzeugkonstruktionen positiv aus. Prototypen erreichten mit Druckwasserstoffbetankung bereits im Jahr 2001 eine Reichweite von 270 Kilometern [Naunin 2004, S.35]. Zudem ist das Brennstoffzellensystem selbst immer leichter und effektiver, so daß die Reichweite für Serienfahrzeuge voraussichtlich im Jahr 2035 auf 700 Kilometer erhöht werden kann. Die Entwicklung der Reichweiten wird in Tabelle 5-10 dargestellt.

Tabelle 5-11: Entwicklung der durchschnittlichen Reichweiten nach Fahrzeugtypen [Volkswagen 2004a, Volkswagen 2004b]

Jahr	Otto	Diesel	Erdgas	Hybrid Otto	Hybrid Diesel	Elektro Akku	Elektro H2
2005	760	970	280	965	1.000	100	110
2010	850	1.009	350	1.005	1.035	194	269
2015	916	1.043	402	1.040	1.065	269	427
2020	964	1.072	441	1.069	1.090	316	530
2025	1.005	1.096	470	1.094	1.111	353	606
2030	1.039	1.116	492	1.114	1.129	381	664
2035	1.069	1.132	510	1.131	1.143	401	706

5.4.6.4 Berechnung der Emissionsanteile

Die Emissionsanteile (emission fraction calculation) der einzelnen Fahrzeugtypen werden jeweils auf den höchsten Emissionswert, den Standardemissionswert (standard emissions), normiert. Die Struktur zur dynamischen Berechnung der Emissionsanteile (emission fraction) ist identisch mit der Berechnung der dynamischen Kaufpreisentwicklung (siehe Abbildung 5-23). Die Emissionsanteile sind in Tabelle 5-11 zusammengefaßt.

Tabelle 5-11 legt die beiden rein elektrischen Antriebe als emissionsfrei (im direkten Betrieb) fest. Bei den Emissionsanteilen der anderen Fahrzeugtypen wird vorausgesetzt, daß die Fahrzeuge mit den heute üblichen Kraftstoffen betrieben werden. Alternative Kraftstoffe werden an dieser Stelle noch nicht berücksichtigt. Die Partikelemissionen werden praktisch nur von Dieselfahrzeugen ohne Partikelfilter ausgestoßen.

Tabelle 5-12: Durchschnittliche Emissionsanteile von Neufahrzeugen im Jahr 2004 [DAT 2004, S.2; UBA 2003c; Volkswagen 2004b]

Emission	Otto	Diesel o. Filter	Diesel m. Filter	Erdgas	Hybrid Otto	Hybrid Diesel	Elektro Akku	Elektro H2	Standard-Emissionen (g/km)
CO ₂	1	0,9	0,9	0,89	0,69	0,621	0	0	180
NO _x	0,12	1	1	0,12	0,0571	0,476	0	0	0,175
HC	0,4038	1	1	0,4038	0,4038	1	0	0	0,052
CO	1	0,7908	0,7908	0,7908	0,9408	0,744	0	0	0,196
PM	0	1	0	0	0	0	0	0	0,013

Die Faktoren zur Steuerung der Emissionsverläufe sind so eingestellt, daß die Emissionsanteile sich proportional zum Kraftstoffverbrauch der Fahrzeugtypen verhalten.

In einem weiteren Schritt wird der Einfluß der alternativen Kraftstoffe auf die Emissionsanteile berücksichtigt. Mit Hilfe der Matrix der Kraftstoffzusammensetzungen (fuel availability Matrix) sowie drei Faktoren zur Berücksichtigung der Emissionsveränderungen beim Einsatz alternativer Kraftstoffe werden die aktuellen Emissionsanteile bestimmt. Exemplarisch sei hier die Formel für konventionelle Fahrzeuge mit Ottomotor dargestellt.

$$(43.) \text{ emission fraction considering fuel type[Gasoline, emission types] = emission fraction[Gasoline, emission types] * fuel availability Matrix[Gasoline, Gasoline from oil] + emission fraction[Gasoline, emission types] * NG into GD[emission types] * fuel availa-}$$

$$\text{bility Matrix[Gasoline, Natural Gas]} + \text{emission fraction[Gasoline, emission types]} * \text{Biomass into GD[emission types]} * \text{fuel availability Matrix[Gasoline, Bio Fuel]}$$

Der berechnete Emissionsanteil wird jeweils mit dem entsprechenden Verfügbarkeitsfaktor aus der Matrix der Kraftstoffzusammensetzungen multipliziert und die Summanden zur Berücksichtigung alternativer Kraftstoffe werden mit den entsprechenden Umrechnungsfaktoren multipliziert. Dabei bedeutet ‚NG into GD‘, daß bei Einsatz von GTL-Kraftstoff aus Erdgas (Natural Gas) in einem Otto- oder Dieselmotor (Gasoline, Diesel) die Emissionen um die entsprechenden Faktoranteile reduziert werden (siehe Abbildung 5-27).

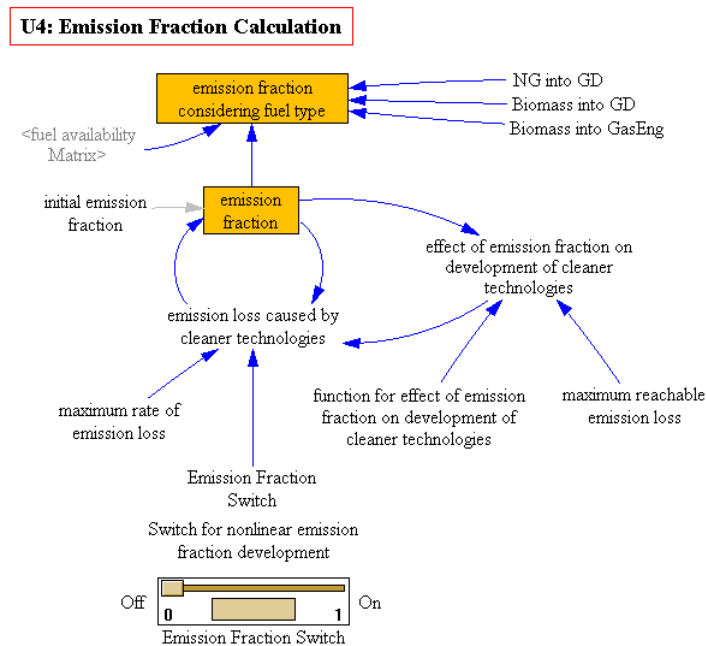


Abbildung 5-27: Berechnung der Emissionsanteile

‚Biomass into GD‘ steht entsprechend für den Einsatz von BTL-Kraftstoffen in diesen Motoren und ‚Biomass into GasEng‘ für den Einsatz des Synthesegases aus Biomasse in einem Erdgasfahrzeug. Diese Umrechnungsfaktoren werden in der folgenden Tabelle 5-12 dargestellt [Behlmer und Wanke 2003; AutoEntw 2004; VDI 2003, S.443].

Tabelle 5-13: Durchschnittliche Emissionsanteile alternativer Kraftstoffe im Jahr 2004

Emission	NG into GD	Biomass into GD	Biomass into GasEng
CO ₂	0,96	0	0
NO _x	0,83	0,959	0,959
HC	0,37	0,222	0,222
CO	0,09	0,15879	0,15879
PM	0,38	0,6	0,6

Da in der Literatur keine Hinweise auf unterschiedliche Emissionsminderungseigenschaften beim Einsatz von Biomasse als BTL-Kraftstoff oder als Synthesegas gegeben sind, werden dieselben durchschnittlichen Emissionsanteile verwendet.

5.4.6.5 Berechnung der Kraftstoffverfügbarkeit und Kraftstoffzusammensetzung

Die Kraftstoffverfügbarkeit nimmt eine zentrale Rolle in der Modellierung der alternativen Kraftstoffe ein. Über sie bestimmt sich die Zusammensetzung der Kraftstoffe, die für den Betrieb von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor genutzt werden. Die Struktur zur dynamischen Berechnung der Kraftstoffverfügbarkeit (fuel availability) ist identisch mit derjenigen zur Berechnung der dynamischen Kaufpreisentwicklung. Die entsprechenden Koeffizienten werden so ausgewählt, daß sich der Verlauf der Kraftstoffverfügbarkeit gemäß der in Abschnitt 2.3.3 erläuterten Richtlinie und der technischen Möglichkeiten entwickelt. Die Ausgangssituation im Jahr 2005 sowie die Entwicklung der Kraftstoffverfügbarkeit im Modell sind in Tabelle 5-13 dargestellt.

Tabelle 5-14: Entwicklung der Kraftstoffverfügbarkeit

Jahr	Otto	Diesel	Erdgas	Biokraftstoff	Elektro Akku	Elektro H2
2005	1	1	0,03	0,02	0,001	0,01
2010	1	1	0,0502	0,0722	0,0122	0,0354
2015	1	1	0,0783	0,1719	0,0905	0,0946
2020	1	1	0,1139	0,2934	0,2719	0,1852
2025	1	1	0,1546	0,4168	0,4674	0,2881
2030	1	1	0,1985	0,5244	0,6251	0,3934
2035	1	1	0,2441	0,6169	0,7404	0,4872

Bei der Kraftstoffverfügbarkeit von Strom werden nur Stationen zur Schnellladung der Akkumulatoren berücksichtigt. Der Ladevorgang soll so in vergleichbarer Zeit wie die Befüllung mit Diesel oder Benzin erfolgen. Das langsame Laden am Haushaltsstromnetz wird nicht berücksichtigt.

Über den Schieberegler (fuel availability switch) in Abbildung 5-28 kann die prognostizierte Kraftstoffverfügbarkeit nicht nur an- und ausgeschaltet, sondern das Eintreten der Prognosen variiert werden. Steht der Schieberegler beispielsweise auf 0,5, dann sind am Ende des Simulationszeitraumes nur halb so viele alternative Kraftstoffe verfügbar, wie in Tabelle 5-13 prognostiziert.

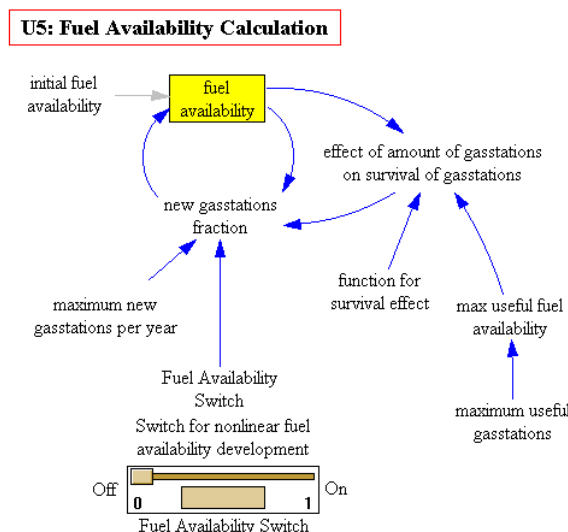


Abbildung 5-28: Berechnung der Kraftstoffverfügbarkeit

Nun kann die Zusammensetzung des Kraftstoffes (fuel composition) bestimmt werden. Hierzu wird aus den Faktoren der Kraftstoffverfügbarkeit die Summe der möglichen Kraftstoffe (sum of possible fuels) für die einzelnen Fahrzeugtypen festgelegt, also die technische Umsetzung der Kraftstoffstrategien berücksichtigt (Abbildung 5-29).

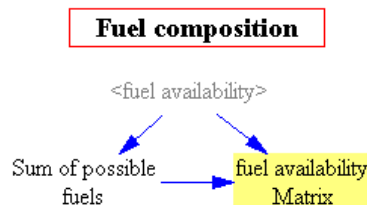


Abbildung 5-29: Berechnung der Kraftstoffzusammensetzung

Für konventionelle Fahrzeuge mit Ottomotor gilt dann die Formel:

$$(44.) \text{ Sum of possible fuels[Gasoline] = fuel availability[Gasoline from oil] + fuel availability[Natural Gas] + fuel availability[Bio Fuel].}$$

Hieraus wird nun die Matrix der Kraftstoffzusammensetzung (fuel availability Matrix) berechnet. Dabei wird für jeden Fahrzeugtyp die Kraftstoffverfügbarkeit als Anteil jeder Kraftstoffart dargestellt. Ist eine Kraftstoffart für einen Fahrzeugtypen nicht verfügbar, so ist der entsprechende Anteilsfaktor in der Matrix gleich null. In der Tabelle 5-14 sind jeweils die Anteilsfaktoren für Otto- und Dieselmotor aus Erdöl, GTL und BTL sowie die Anteilsfaktoren für Biosynthesegas am Erdgas für Fahrzeuge (CNG) angegeben. Sie entsprechen dem Eintreten der Prognosen und Vorschriften aus Abschnitt 3.3.2.2. (Umweltauflagen im Verkehr), also dem Fall der simuliert wird, wenn der Schieberegler der Kraftstoffverfügbarkeit (fuel availability switch) auf ,1' gestellt ist.

Tabelle 5-15: Entwicklung der Kraftstoffanteile für Otto-, Diesel- und Gaskraftstoffe

Jahr	Benzin	GTL	BTL	Diesel	Diesel GTL	Diesel BTL	GasEng NG	GasEng Bio
2005	0,9523	0,0285	0,0190	0,9523	0,0285	0,0190	0,9809	0,0190
2010	0,8908	0,0447	0,0643	0,8908	0,0447	0,0643	0,9356	0,0643
2015	0,7997	0,0626	0,1375	0,7997	0,0626	0,1375	0,8624	0,1375
2020	0,7105	0,0809	0,2084	0,7105	0,0809	0,2084	0,7915	0,2084
2025	0,6363	0,0984	0,2652	0,6363	0,0984	0,2652	0,7347	0,2652
2030	0,5804	0,1152	0,3043	0,5804	0,1152	0,3043	0,6956	0,3043
2035	0,5373	0,1311	0,3314	0,5373	0,1311	0,3314	0,6685	0,3314

5.4.6.6 Berechnung der durchschnittlichen Motorleistung

Die Struktur zur dynamischen Berechnung der durchschnittlichen Motorleistung (horsepower calculation) ist identisch mit derjenigen zur Berechnung der dynamischen Kaufpreisentwicklung. Auch hier werden lediglich die Faktoren entsprechend der erwarteten technischen Entwicklung angepaßt.

Die Ausgangswerte entsprechen den durchschnittlichen Werten des Jahres 2003 [SRU 2005, S.166]. Die durchschnittliche Motorleistung der einzelnen Fahrzeugtypen im Jahr 2005 sowie

die weitere Entwicklung der durchschnittlichen Motorleistungen als gerundete Werte sind in Tabelle 5-15 dargestellt.

Tabelle 5-16: Entwicklung der durchschnittlichen Motorleistung [DAT 2004, S. 11ff., 45]

Jahr	Otto	Diesel	Erdgas	Hybrid Otto	Hybrid Diesel	Elektro Akku	Elektro H2
2005	84	79	79	84	79	20	60
2010	88	83	85,5	90	85,5	29	73
2015	91,5	87	91	95	91	37	82
2020	95	91	96	99	96	43	90
2025	97,5	94	100	102	100	48	97
2030	100	97	103	105	103	52	101,5
2035	102	100	106	108	106	55,5	105

Simuliert wird der Trend bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor hin zu immer größerer Motorleistung (siehe Abbildung 5-30). Die angestrebte Obergrenze (maximum useful development of horsepower) beträgt hierbei 130 kW.

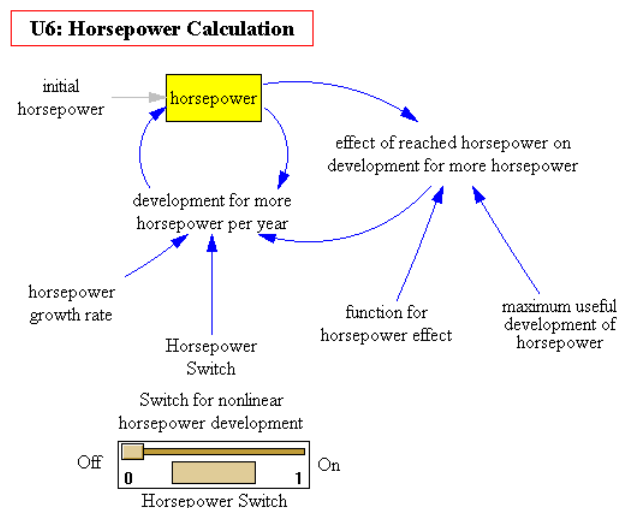


Abbildung 5-30: Dynamische Berechnung der durchschnittlichen Motorleistung

Auch bei Brennstoffzellenfahrzeugen konnte bei Prototypen bereits im Jahr 2001 eine Motorleistung von 100 kW realisiert werden [Naunin 2004, S.35]. Daher wird für den Serieneinsatz zunächst eine durchschnittliche Motorleistung von 60 kW angenommen, die dann der gleichen Obergrenze entgegenstrebt, wie bei den Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Bei den Elektrofahrzeugen mit Akkumulator wird die Motorleistung des VW CitySTROMers als Ausgangswert gewählt [Naunin 2004, S.11]. Die Steigerung der durchschnittlichen Motorleistung wird durch die Fortschritte in der Akkumulatorentwicklung bestimmt [SRU 2005, S.164; Bosch 2002, S.640].

5.4.7 Weitere exogene Rahmenbedingungen im Modell

Bei allen im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Analysen soll keine Einschränkung der Mobilität erfolgen. Dies bedeutet, daß der Gesamtfahrzeugbestand immer den gleichen Verlauf annehmen soll, unabhängig von der Intensität des umweltpolitischen Instrumenteneinsatzes.

zes und der Variation der exogenen Rahmenbedingungen [IFMO 2005, S.31]. Die einzige Ausnahme hiervon stellt die Zahlung einer Verschrottungsprämie dar, bei deren Einsatz sich auch der Gesamtfahrzeugbestand verändern kann.

Rebound-Effekte werden also bewußt ausgeschlossen, damit Veränderungen der Gesamtemissionen ausschließlich auf Veränderungen der Marktanteile durch voneinander abweichenden umweltpolitischen Instrumenteneinsatz zurückgeführt werden können. Bei der Entwicklung des Fahrzeugbestandes wird im Mittel von einer Steigerung des gesamten Pkw-Bestandes in Deutschland von etwa 45 auf 50 Millionen Fahrzeuge bis zum Jahr 2025 ausgegangen [SRU 2005, S.81f.; Shell 2004, S. 31].

Neben den im Modell exogen vorgegebenen und im folgenden erläuterten exogenen Rahmenbedingungen ‚Kraftstoffpreisentwicklung‘ und ‚Fahrleistungen‘ gibt es noch Faktoren wie beispielsweise demographische und gesamtwirtschaftliche Entwicklungen sowie Veränderungen der Raumstruktur, die im Modell nicht explizit untersucht werden.¹⁶¹

5.4.7.1 Kraftstoffpreisentwicklung

Die Entwicklung der Wareneinstandspreise für die im Modell berücksichtigten Kraftstoffarten ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, deren präzise Vorhersage unmöglich ist. Im Modell wird daher mit einem langfristigen Mittelwert gerechnet. Da im Personenverkehr kurzfristige Schwankungen der Kraftstoffpreise keinen großen Einfluß auf das Nachfrageverhalten haben, werden durch diese Annahme keine systematischen Fehler verursacht. Eine Steigerung der Kraftstoffpreise um 10 Prozent löst in der kurzfristigen Betrachtung einen Nachfragerückgang um lediglich 3 Prozent aus. Diese Ergebnisse werden in Studien zur Preiselastizität der Kraftstoffnachfrage bestätigt [SRU 2005, S. 169].

Im Modell werden die Wareneinstandspreise (initial average fuel cost before tax) im Modul ‚U2 (a)‘: Berechnung der spezifischen Kraftstoffkosten‘ eingeführt (vgl. Abbildung 5-25 in Abschnitt 5.4.7.2.). Die Ausgangswerte sind in Tabelle 5-16 zusammengefaßt.

Tabelle 5-17: Wareneinstandspreise für Kraftstoffe im Jahr 2005 [ARAL 2006a, 2006b; 2005a, 2005b]

Ottokraftstoff	Diesekraftstoff	Erdgas	Biokraftstoff	Strom	Wasserstoff
37 Ct/l	40,75 Ct/l	56,5 Ct/kg	60 Ct/l	12,6 Ct/kWh	300 Ct/kg

Der Preis für Ottokraftstoff beträgt im Jahr 2005 durchschnittlich 37 Cent pro Liter, für Diesel beträgt er 40,75 Cent pro Liter [ARAL 2006a, 2006b; 2005a, 2005b]. Der Preis für Erdgas als Kraftstoff beträgt 56,5 Cent pro kg, was unter Berücksichtigung des Brennwertes von 13,2 kWh pro kg gegenüber 8,8 kWh pro Liter Ottokraftstoff einem Preis von $56,5 \cdot (8,8 / 13,2) = 37,7$ Cent pro Liter entspricht [Gibgas 2006]. Der Strompreis beträgt 2005 durchschnittlich 12,6 Cent pro kWh, wobei hier regionale und tageszeitliche Schwankungen auftreten [BdF 2006b]. Der Preis für Biokraftstoff beträgt wie in Abschnitt 2.3.3 er-

¹⁶¹ Siehe hierzu beispielsweise [Dekimpe et al. 2000, S. 58; Ratzenberger 1998, S. 190ff.; IWW 1996]

läutert 60 Cent pro Liter und sinkt innerhalb von 15 Jahren auf 40 Cent pro Liter. Der Preis für Wasserstoff wird gemäß Abschnitt 2.3.7 mit 300 Cent pro kg angenommen.

Die Veränderung der Wareneinstandspreise wird durch einen Preissteigerungszins (interest rate for fuels) berücksichtigt. Dabei wird für Kraftstoffe aus fossilen Energieträgern angenommen, daß sich die Kraftstoffpreise innerhalb von 20 Jahren verdoppeln werden [IFMO 2005, S.45; Dudenhöffer 2005a, S.332]. Dies wird in den Formeln durch die Variable ‚time for doubling of fuel price‘ berücksichtigt. Sie ist im Modell als Schieberegler ausgeführt und kann bei Bedarf variiert werden.

$$(45.) \text{ interest rate for Fuels[Gasoline from oil]} = (2^{(1/\text{time for doubling of fuel price})})^{\wedge} (\text{Time}-2005)$$

$$(46.) \text{ interest rate for Fuels[Diesel from oil]} = (2^{(1/\text{time for doubling of fuel price})})^{\wedge} (\text{Time}-2005)$$

$$(47.) \text{ interest rate for Fuels[Natural Gas]} = (2^{(1/\text{time for doubling of fuel price})})^{\wedge} \{1.01\}^{\wedge} (\text{Time}-2005)$$

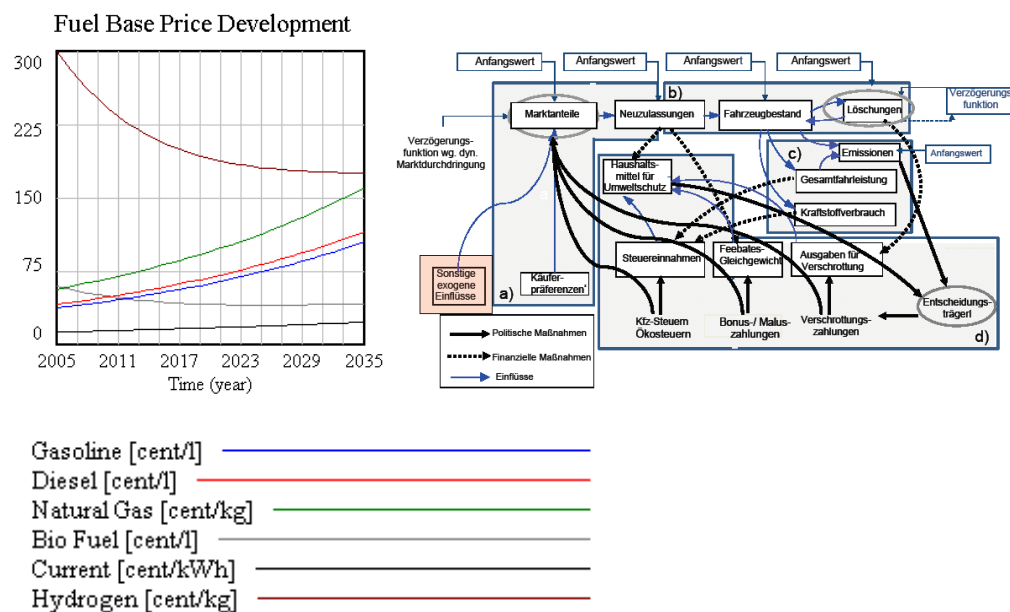


Abbildung 5-31: Entwicklung der Wareneinstandspreise für Kraftstoffe

Die Preisentwicklung der anderen Energieträger wird im Modell nicht variabel modelliert. Für Strom wird eine jährliche Verteuerungsrate von zwei Prozent angenommen.

$$(48.) \text{ interest rate for Fuels[Current]} = 1.02^{\wedge} (\text{Time}-2005)$$

Die Preisentwicklungen für Kraftstoffe aus Biomasse und für Wasserstoff entsprechen den in den entsprechenden Kapiteln beschriebenen Preisverläufen.

$$(49.) \text{ interest rate for Fuels[Bio Fuel]} = (0.9^{\wedge} (\text{Time}-2005) + 1.005^{\wedge} (2^{\wedge} (\text{Time}-2005)))) / 2$$

$$(50.) \text{ interest rate for Fuels[Hydrogen]} = (0.9^{\wedge} (\text{Time}-2005) + 1.002^{\wedge} (2^{\wedge} (\text{Time}-2005)))) / 2$$

den mit 15,34 Cent pro Liter, Erdgas mit 5,71 Cent pro kg und Strom mit 2,05 Cent pro kWh besteuert.

In einem zweiten Schritt wird die akkumulierte jährliche Fahrleistung (annual travel) für jeden Fahrzeugtyp berechnet. Sie besteht aus der Summe der im Fahrzeugsektor für jede Altersklasse berechneten akkumulierten Fahrleistungen jedes Fahrzeugtyps. Dann wird die Summe der erhobenen Ökosteuererinnahmen, nach den jeweiligen Kraftstoffarten (nominal eco tax collected), in Euro berechnet. Exemplarisch sei an dieser Stelle die Formel für Benzin aus Mineralöl dargestellt.

$$(52.) \text{ nominal eco tax collected[Gasoline from oil]} = ET[\text{Gasoline from oil}] * 0.01 \{ \text{because of litre/100km} \} * \text{"Euro/cent"} * (\text{annual travel[Gasoline]} * \text{average fuel consumption[Gasoline]} * \text{fuel availability Matrix[Gasoline, Gasoline from oil]} + \text{annual travel[Hybrid Gasoline]} * \text{average fuel consumption[Hybrid Gasoline]} * \text{fuel availability Matrix[Hybrid Gasoline, Gasoline from oil]})$$

Dieser berechnete Wert hat Einfluß auf die Haushaltspolitik; daher wird die Verwendung dieses Wertes im Abschnitt 5.4.10 näher erläutert.

5.4.8.2 Bonus- und Maluszahlungen auf den Kaufpreis

Das ökonomische Instrument der Bonus- und Maluszahlungen auf den Kaufpreis kann für jeden Fahrzeugtyp über einen Schieberegler während der Simulation gemäß der verfolgten Politik eingestellt werden (siehe Abbildung 5-44 in Abschnitt 5.4.11). Die Höhe der Bonus- und Maluszahlungen ist in der Simulation auf die Maximalwerte von 8000 Euro pro Fahrzeug begrenzt. Sie liegen somit im Rahmen der Inzentivierungen, die auch in der Realität angewendet werden sollen. So wurde Elektrofahrzeugen in den USA bis zum Jahr 2002 bereits ein Steuernachlaß von bis zu 4000 US-Dollar gewährt, in Kalifornien sogar 5000 US-Dollar [Naunin 2004, S.8]. Für Hybridfahrzeuge wird im spanischen Staat Castilla y León bei einem Neukauf eine Unterstützung von 4808 Euro gezahlt. In Großbritannien werden bei Kauf eines Hybridfahrzeuges 4500 Euro von der Zulassungssteuer erlassen, in den Niederlanden sind es bis zu 7108 Euro und in Polen 2746 Euro [ACEA 2005a]. Die Bonus- (rebate) und Maluszahlungen (fee) fließen in die Berechnung des Kaufpreises der Fahrzeuge (purchase price calculation) und in den Umwelthaushalt (financial status calculation) mit ein. Ihre Verknüpfungen werden in dem entsprechenden Abschnitt 5.4.10 erläutert.

5.4.8.3 Kfz-Steuer auf Basis der CO₂-Emissionen

Die finanzielle Belastung des Fahrzeughalters durch das ökonomische Instrument der Kfz-Steuerumstellung fließt im Modell bei der Bestimmung des Käuferverhaltens an gleicher Stelle ein, wie die jährlichen Kraftstoffkosten. Der Beeinflussungskoeffizient (coefficient 2b) ist mit –0,3 jedoch ein wenig geringer angesetzt, da die Kosten der Kfz-Steuerumstellung – bedingt durch die bereits bestehende Kfz-Steuer auf den Hubraum – vom Käufer weniger Be-

achtung finden. Daher wird bei der Umstellung auf die CO₂-emissionsbasierte Kfz-Steuer lediglich die sich dabei ergebende Differenz berücksichtigt. Der fiskalische Effekt wird bei der Berechnung des Staatshaushaltes ebenfalls berücksichtigt.

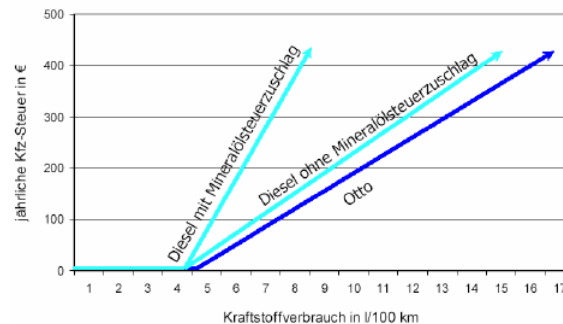
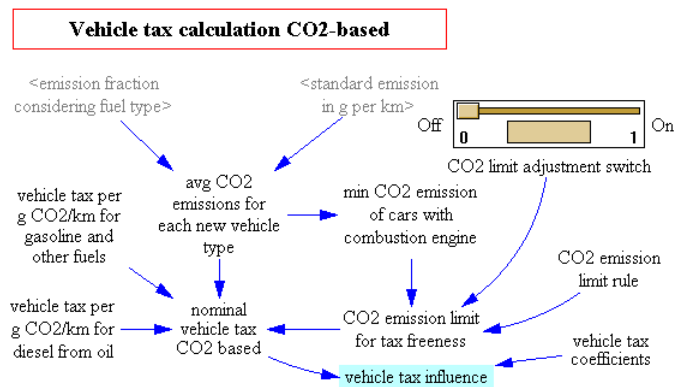


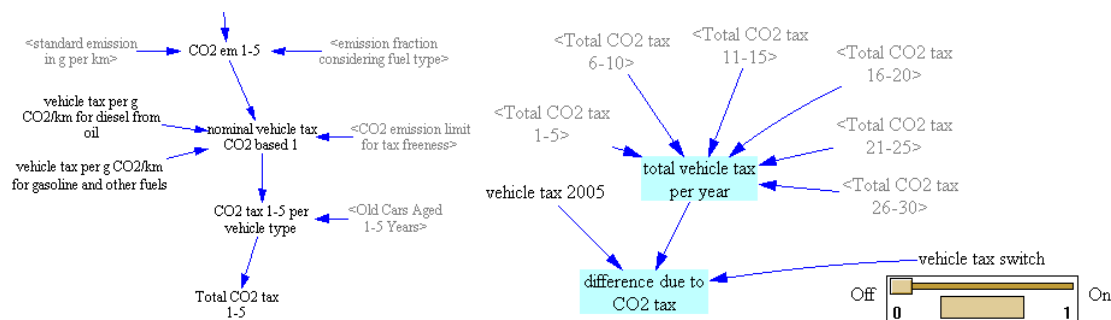
Abbildung 5-34: CO₂-emissionsbasierte Kfz-Steuersätze nach der Umstellung [Albrecht 2005]

Grundlage des im Modell eingesetzten Kfz-Steuermodells ist das im Dezember 2004 vom ADAC vorgeschlagene Umstellungskonzept, das linear steigende Steuersätze vorsieht und für die Autofahrer finanziell neutral sein soll [Meyer 2005]. Die Steuerformel besagt, daß für jedes emittierte Gramm CO₂ pro km über der Grenze für Steuerfreiheit von 100 g CO₂/km (CO₂ emission limit for tax freeness) für Pkw mit Ottomotor 1,3755 Euro (vehicle tax per g CO₂/km for gasoline and other fuels) und für Pkw mit Dieselmotor 3,6250 Euro (vehicle tax per g CO₂/km for diesel from oil) gezahlt werden müssen. Bei Dieselfahrzeugen fallen hiervon 2,2595 Euro als Mineralölsteuerausgleich an [Albrecht 2005]. Somit wären Fahrzeuge mit einem Verbrauch von weniger als 4 Litern/100 km oder mit reinem Elektroantrieb steuerfrei [Tartler 2004].

Zu Beginn der Simulation im Jahr 2005 wird vorausgesetzt, daß die Einnahmen exakt denen der alten Berechnungsgrundlage entsprechen (vehicle tax 2005). Durch die im Laufe der Zeit auftretenden Verschiebungen der Fahrzeugstruktur bezüglich Hubraum und die dazu nicht proportional verlaufenden CO₂-Emissionen treten zwangsläufig Opportunitätskosten auf, so daß eine Anpassung der Steuereinnahmen notwendig wird. Im Modell wird hierfür die Grenzemission der Steuerfreiheit nach unten korrigiert. Erreicht ein Fahrzeugtyp mit Verbrennungsmotor eine durchschnittliche CO₂-Emission, die 10 g CO₂/km über dem aktuellen Grenzwert liegt, so wird der Grenzwert um 5 g CO₂/km nach unten verschoben (CO₂ emission limit rule). Auf diese Weise können die Lenkungswirkungen der Umstellung auch in Zukunft beibehalten und die fiskalischen Auswirkungen effektiv beschränkt werden. Die Struktur zur Bestimmung der Lenkungswirkung (vehicle tax influence) ist in Abbildung 5-35 dargestellt, wobei die unterschiedlichen Auswirkungen der Umstellung bezüglich der verschiedenen Fahrzeugtypen durch die ‚vehicle tax coefficients‘ berücksichtigt werden.

Abbildung 5-35: Berechnung der Kaufentscheidungsbeeinflussung durch die CO₂-basierte Kfz-Steuer

Die fiskalische Wirkung wird in der Abbildung 5-36 (links) dargestellt. In der Alterungskette wird für jeden Fahrzeugtyp die Kfz-Steuer zunächst pro Fahrzeug (nominal vehicle tax CO₂ based) und dann für alle Fahrzeuge dieser Altersklasse (z.B. Total CO₂ tax 1-5) berechnet.

Abbildung 5-36: Berechnung der fiskalischen Wirkungen der CO₂-basierten Kfz-Steuer in der Alterungskette

Die einzelnen Beträge werden dann zu einer Gesamtsumme der Steuereinnahmen addiert und die Differenz aus den Kfz-Steuereinnahmen des Jahres 2005 und den aktuellen Kfz-Steuereinnahmen gebildet (vgl. Abbildung 5-36 rechts).

Die Umstellung auf die CO₂-basierte Kfz-Steuer kann über einen Schieberegler ein- und ausgeschaltet werden (vehicle tax switch). Dann wird die Lenkungs- und die fiskalische Wirkung nicht berücksichtigt. Auch die dynamische Anpassung der Steuerfreiheitsgrenze kann ausgeschaltet werden.

5.4.8.4 Verschrottungsprämien

Die Verschrottungsprämien haben einen Einfluß auf die Anzahl der Fahrzeugstillegungen im Modell für die Fahrzeuge, die älter als 15 Jahre sind. Die Basisrate der Verschrottungszahlungen (base scrappage rate) wird durch eine nichtlineare Verschrottungsfunktion (scrappage function) bestimmt. Diese hat als Inputvariable die auf die maximal mögliche Höhe der Verschrottungsprämie normierte tatsächliche Verschrottungszahlung. Die Gleichung für die Normierung lautet:

$$\text{Input (scrappage function)} = \frac{\text{scrappage payment}[\text{€}]}{\text{max scrappagepayment}[\text{€}]} = \frac{\text{scrappage payment}}{1235\text{€}} [\text{Dmnl}]$$

Zur Bestimmung einer sinnvollen Höhe der Verschrottungszahlungen (1235 EUR) werden die durchschnittlichen Restwerte für Gebrauchtwagen in Deutschland herangezogen. Der Wertverlust hängt zum einen von der Marke, der Fahrzeugklasse und dem Aufbau, zum anderen vom Fahrzeugzustand sowie der durchschnittlichen Fahrleistung ab [Schwacke 2004a, S. 8; Schwacke 2004b, S. 13].

Der Wiederverkaufswert über den Zeitverlauf entwickelt sich nicht linear, sondern weist eine degressiv sinkende Tendenz auf. So ist der Wertverlust neuerer PKW deutlicher ausgeprägt als bei älteren Fahrzeugen (Tabelle 5-17) [Schwacke 2003, S. 4ff.; ADAC 2004c, S. 3ff.].

Tabelle 5-18: Durchschnittspreise, Wiederverkaufs- und Restwerte von PKW in 2004 nach Zulassungsjahren
[Eigene Berechnungen nach Schwacke 2003, S. 4ff.; ADAC 2004c, S. 3ff.]

Alter	Jahr	Durchschnittspreis in EUR	Wiederverkaufswert in Prozent ¹	Durchschnittl. Restwert 2004 in EUR ²
1	2003	22.360	67	14.924
2	2002	21.930	59	13.034
3	2001	21.165	53	11.211
4	2000	20.045	47	9.425
5	1999	19.120	42	7.986
6	1998	19.225	37	7.116
7	1997	18.765	33	6.150
8	1996	18.865	28	5.346
9	1995	17.845	23	4.176
10	1994	17.690	21	3.692
11	1993	16.360	16	2.614
12	1992	16.410	12	1.969
13	1991	15.290	9	1.376
14	1990	15.340	7	1.074
15	1989	14.470	5	724
16	1988	13.855	4	554
17	1987	12.935	3	388
18	1986	12.065	2	241
19	1985	11.250	1	113
20	1984	10.735	1	107
¹ Prozent des Neupreises, Restwerte ab 13 Jahre fortgeschrieben (Schätzung)				
² Multiplikation des Durchschnittspreises mit dem jeweiligen Wiederverkaufswert				

Um spätere Korrekturen an der möglichen Höhe der Verschrottungszahlungen zu erleichtern, wird die Lookup-Variable auf den maximal vorgesehenen Betrag von 1235 EUR normiert, so daß dieser als 100 Prozent eingestellt wird. Die Berechnung des tatsächlichen Anteils der teilnehmenden Fahrzeugbesitzer am Gesamtbestand erfolgt nun über den nichtlinearen Zusammenhang dieser normierten Verschrottungsfunktion, die den Anteil der am Verschrottungsprogramm teilnehmenden Fahrzeugbesitzer abhängig von der prozentualen Höhe der Verschrottungszahlung abbildet [BenDor 2004, S. 8].

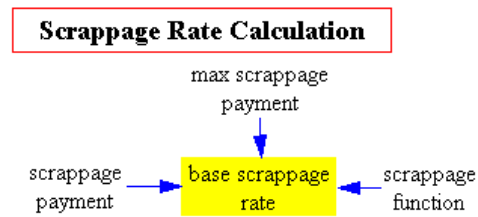


Abbildung 5-37: Berechnung der Basisrate der Verschrottungsprämien

Damit werden die Effekte von Verschrottungszahlungen auf die Altersverteilung im Fahrzeugbestand für den deutschen Pkw-Bestand berücksichtigt. Die Basisverschrottungsrate berechnet sich nun über die nichtlineare Verschrottungsfunktion nach der Gleichung:

$$(53.) \text{ base scrappage rate} = \text{scrappage function}(\text{scrappage payment} / \text{max scrappage payment})$$

Die jährliche Gesamtsumme aller gezahlten Verschrottungsprämien erfolgt im Modul ‚Total Scrappage Payment Calculation‘.

5.4.8.5 Produktionsschluß für Dieselfahrzeuge ohne Partikelfilter

Derzeit werden Partikelfilter von den meisten Fahrzeugherstellern nur teilweise serienmäßig angeboten. Die Fahrzeughersteller sind bemüht, die ab 1. Januar 2005 in Kraft tretenden EURO-4-Grenzwerte ohne Partikelfilter zu erreichen. Spätestens mit dem für 2010 erwarteten Inkrafttreten der fünften Stufe wird jedoch ein Einsatz unumgänglich sein (siehe Abschnitt 2.4.4) [UBA 2005b; SRU 2005, S: 159]. Es ist zu erwarten, daß spätestens ab dem Jahr 2008 bei Dieselfahrzeugen keine Neufahrzeuge ohne Partikelfilter mehr produziert werden, da sich diese dann kaum noch verkaufen lassen. Im Modell wird dieser Tatsache durch einen Eingriff in die ‚Total Sales Calculation‘ (Abbildung 5-18 in Abschnitt 5.4.5) berücksichtigt. Hierzu wird mit der Formel:

$$(54.) \text{ sales}[\text{Diesel without Filter}] = \text{IF THEN ELSE}(\text{Time} < \text{year with no new nonfiltered Diesel}, \text{real market shares}[\text{Diesel without Filter}] * \text{total sales}, 0)$$

die Anzahl der Neuverkäufe an Dieselfahrzeugen ohne Partikelfilter ab dem Jahr des Produktionsschlusses (year with no new nonfiltered Diesel) auf null gesetzt. In der Formel:

$$(55.) \text{ sales}[\text{Diesel with Filter}] = \text{IF THEN ELSE}(\text{Time} < \text{year with no new nonfiltered Diesel}, \text{real market shares}[\text{Diesel with Filter}] * \text{total sales}, (\text{real market shares}[\text{Diesel with Filter}] + \text{real market shares}[\text{Diesel without Filter}]) * \text{total sales})$$

wird die Anzahl an neuverkauften Dieselfahrzeugen mit Filter um die Anzahl der Dieselfahrzeuge ohne Filter ergänzt. Kunden, die sich für den Kauf eines Dieselmotors entschlossen haben, welches nicht mit einem serienmäßigen Filter angeboten wurde, entscheiden sich auch nach der serienmäßigen Ausrüstung für das gleiche Modell.

5.4.8.6 Nachrüstung von Partikelfiltern bei Dieselfahrzeugen

Neben der serienmäßigen Ausstattung mit Partikelfilter ist auch die Nachrüstung bei vielen Dieselfahrzeugen gegen Aufpreis möglich [UBA 2005b; SRU 2005, S: 159]. Um die Fahrzeughalter zum Nachrüsten ihres Fahrzeuges zu bewegen, sind Umrüstungsprämien [Doemens 2005] oder die jährliche Erhebung eine Abgabe für Fahrzeuge ohne Partikelfilter [SRU 2005, S.159] im Gespräch. Hierbei sind Beträge in der Größenordnung um 300 Euro geplant.¹⁶³ In Österreich werden seit dem 1. Januar 2006 Dieselfahrzeuge mit Partikelfilter mit 300 Euro begünstigt und Dieselfahrzeuge ohne Partikelfilter mit einem Malus von 150 Euro belegt. Dieser wird ein Jahr später auf 300 Euro erhöht [UBA 2005b].

Im Modell wird die Abgabe mit einer höheren Maluszahlung für Dieselfahrzeuge ohne Partikelfilter (extra fee for Diesel without Filter) berücksichtigt (Abbildung 5-38). Die Kosten für die Nachrüstung sind je nach Hersteller und Fahrzeug verschieden und liegen ohne Einbau zwischen 490 und 800 Euro [Dudenhöffer 2005b, S.4]. Daher wird von einem gesamten Aufwand in Höhe von 800 Euro inklusive Einbaukosten und zusätzlichen Aufwendungen des Fahrzeughalters (cost for equipping PM_x-Filter) ausgegangen. Eine Nachrüstung ist ab dem Jahr 2006 möglich und wird im Verlauf eines Jahres durchgeführt, da der Zeitaufwand gering ist.

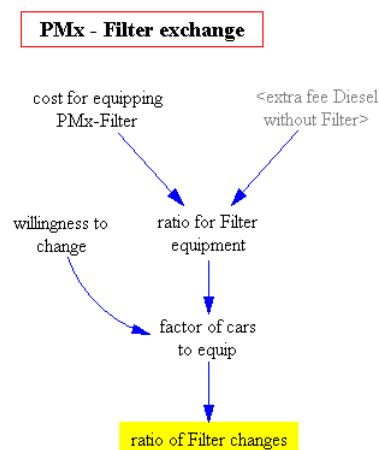


Abbildung 5-38: Berechnungsstruktur der Partikelfilter-Nachrüstungsrate

Die Bereitschaft zum Nachrüsten eines Partikelfilters wird durch die Lookup-Variable ‚willingness to change‘ antizipiert. Ihr s-förmiger Verlauf ist in Abbildung 5-39 dargestellt. Eingangsgröße ist dabei das Verhältnis zwischen der Höhe den jährlichen Maluszahlungen und den Umrüstungskosten. Ist es Null, so wird kein Anreiz zum Umrüsten gegeben. Beträgt der Malus die Hälfte der Umrüstungskosten, so rüsten ein Drittel, ist der Malus gleichgroß, so

¹⁶³ Inzwischen haben die Länderfinanzminister eine Steuererleichterung von 330 Euro für den nachträglichen Einsatz eines Partikelfilters in ein bereits zugelassenes Fahrzeug eingeführt. Der Standardsteuersatz für Dieselfahrzeuge wird gleichzeitig um 1,30 Euro pro Jahr und 100ccm Hubraum angehoben (Stand März 2007) [Global Insight 2007].

rüsten 90 Prozent der Fahrzeughalter um. Dabei wird berücksichtigt, daß nicht für alle Fahrzeuge eine Nachrüstung möglich ist. Dies ist vor allem bei älteren Fahrzeugen der Fall, welche auch einen geringeren Restwert haben.

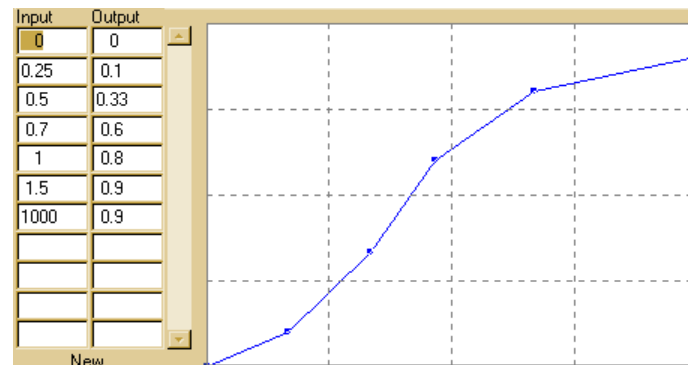


Abbildung 5-39: Verlauf der Variablen 'willingness to change'

Neuere Dieselfahrzeuge verlieren ohne Filter schneller an Wert. So ist beispielsweise der Verkaufspreis eines filterlosen VW Golf TDI in drei Jahren um 765 Euro geringer als der eines Golfs mit Filter [UBA 2005b].

Die Berücksichtigung der Umrüstungen findet im Modul 'Scrappage Summary' statt (siehe Abbildung 5-40).

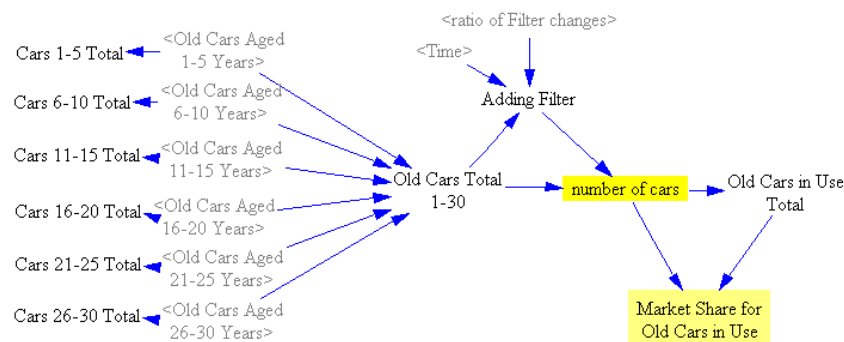


Abbildung 5-40: Berücksichtigung der Umrüstungen im Fahrzeugbestand

Nachdem die Anzahl der Fahrzeuge aus der Alterungskette berechnet worden ist, wird zunächst die Anzahl umgerüsteter Fahrzeuge bestimmt (Adding Filter). Diese wird dann in der endgültigen Zählung der Fahrzeuge (number of cars) berücksichtigt, aus der auch die aktuellen Marktanteile aller Fahrzeuge berechnet werden.

5.4.9 Haushaltspolitikmodelle für die Bonus- und Maluszahlungen

Da die Maluseinnahmen in Form von zweckgebundenen Sonderabgaben anfallen, die zur Finanzierung der Bonuszahlungen verwendet werden müssen, wird ein Sonderhaushalt eingerichtet. Mit der Maßgabe einer möglichst aufkommensneutralen Zusammensetzung dieses Haushaltes ergibt sich die in Abbildung 5-41 dargestellte Berechnungsstruktur. Zu Beginn der Simulation beträgt der Haushalt (initial balance) 75 Millionen Euro. Die Summe aller Maluszahlungen (fees collected) fließt in den Haushalt ein. Die Summe der ausgezahlten Bo-

nuszahlungen fließt aus dem Haushalt wieder heraus. Hierzu werden auch die gesamten Verschrottungsprämien (total scrappage payments) gezahlt. Das Guthaben des Haushaltes wird mit 6,5 Prozent verzinst (interest rate), wobei je nach Haushaltslage diese Zinsen als Kreditzinsen oder Kapitalerträge dem Haushalt abgezogen werden oder ihm zufließen (interest earnings).

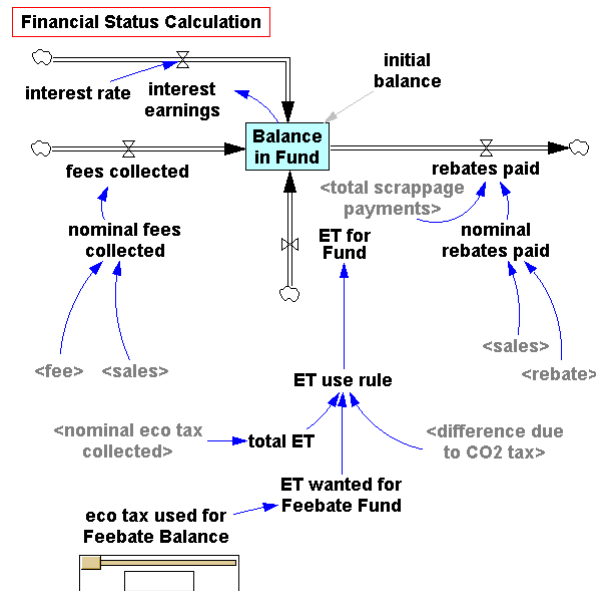


Abbildung 5-41: Haushaltspolitikmodell in der Basisvariante

Eine weitere Einnahmequelle zum Ausgleich des Haushaltes kann aus den Ökosteureinnahmen (ET for Fund) erfolgen. Hierbei werden zwei unterschiedliche Politiken umgesetzt (ET use rule).

Die erste Politikoption wird als ‚Basisvariante‘ eingeführt. Dabei kann der Betrag, der dem Bonus-/Malus-Haushalt aus Ökosteuer zufließen soll, festgelegt werden (eco tax used for Feebate Balance). Oberste Priorität bei der Verteilung der Ökosteureinnahmen hat jedoch zunächst die Finanzierung der Einnahmeausfälle bedingt durch die Kfz-Steuerumstellung (difference due to CO2 tax). Da sich die simulierte Regierung viel von dem Bonus- und Malussystem verspricht, können die verbleibenden Ökosteureinnahmen für den Haushalt des Bonus- und Malussystems eingesetzt werden. Unterschreiten diese den angeforderten Betrag, so werden lediglich die noch verfügbaren Ökosteureinnahmen zur Verfügung gestellt. Eine Möglichkeit, den gewünschten Betrag aus den Ökosteureinnahmen für den Haushalt wieder zu erhalten, ist die Erhöhung der Ökosteuern. Dies kann damit gerechtfertigt werden, daß sich die Einnahmen aus der Kfz-Steuer und somit die Belastungen der Fahrzeughalter verringert haben. Diese Politik wird durch die Formel:

$$(56.) \text{ IF THEN ELSE} (\text{total ET} + \text{difference due to CO2 tax} > \text{ET wanted for Feebate Fund}, \\ \text{ET wanted for Feebate Fund}, \text{total ET} + \text{difference due to CO2 tax})$$

umgesetzt.

Das zweite in dieser Arbeit eingesetzte Politikmodell wird als ‚Advanced-Variante‘ bezeichnet. Es ist in Abbildung 5-42 dargestellt.

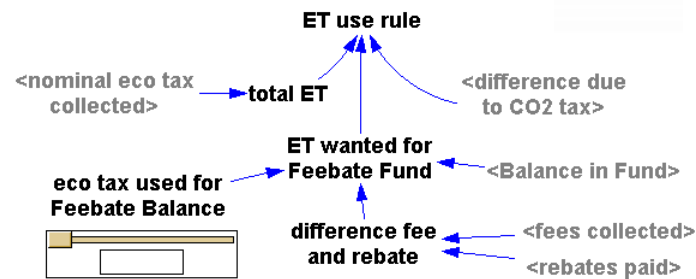


Abbildung 5-42: Haushaltspolitikmodell in der Advanced-Variante

Diese Politikvariante berücksichtigt einige weitere Bedingungen, wenn die volle Höhe der angeforderten Unterstützungszahlungen aus den Ökosteureinnahmen erfolgen soll. Diese werden in der Variablen ‚ET wanted for Feebate Fund‘ mit der Formel:

(57.) *IF THEN ELSE (difference fee and rebate > 0 :AND: Balance in Fund < 7.5e+007, IF THEN ELSE(difference fee and rebate < {max} eco tax used for Feebate Balance, difference fee and rebate,{max} eco tax used for Feebate Balance), 0)*

genauer definiert. Zunächst wird der Fehlbetrag zwischen den Einnahmen und Ausgaben der Bonus- und Maluszahlungen (difference fee and rebate) ermittelt. Nur dann, wenn die Summe der Bonuszahlungen höher ist als die Einnahmen aus den Maluszahlungen und gleichzeitig die Rücklagen im Haushalt (Balance of Fund) geringer als das Startkapital von 75 Millionen Euro sind, können Unterstützungszahlungen aus der Ökosteuer dem Haushalt zugeführt werden. Hiermit soll kurzfristig die Zahlungsfähigkeit der Bonuszahlungen aus dem Haushalt sichergestellt werden, während gleichzeitig verhindert wird, daß die Einnahmen der Ökosteuer zu einem festen Bestandteil des Haushaltes werden. Dadurch wird erreicht, daß die Maluszahlungen für die einzelnen Fahrzeuge höher ausfallen und sich der Lenkungseffekt verstärkt. Weiterhin fließt jetzt nur noch der Betrag in den Haushalt, der zur Finanzierung der Einnahmeausfälle tatsächlich benötigt wird. Der angeforderte Betrag (eco tax used for Feebate Balance) stellt somit eine maximale Obergrenze der Haushaltsunterstützung in Form von Ökosteuerzahlungen dar, damit der Rest der Ökosteuer für andere Zwecke (z.B. Kfz-Steuerungsumstellung) zur Verfügung steht. Nach wie vor gilt, daß im Falle einer vollständigen Zahlung der maximalen Haushaltsunterstützung das verbleibende Aufkommen aus der Ökosteuer ausreichen muß, ansonsten wird nur der verfügbare Betrag bezahlt. Dies kann als Begründung genommen werden, um die Ökosteuer im kommenden Jahr zu erhöhen.

Bei der ‚Basisvariante‘ besteht dagegen die Gefahr einer Senkung (oder geringeren Anhebung) der Maluszahlungen, so daß die Ökosteuerzahlungen als feste Einnahmequelle des ‚Bonus-Fund‘ interpretiert werden könnte. Auch bei dem ‚Advanced-Modell‘ kann eine Erhöhung der Ökosteuern erfolgen, aber erst dann, wenn die Summe der Zahlungsverpflichtungen für die Ökosteuer die Einnahmen übersteigt. Die Obergrenze für die Unterstützungszah-

lungen ist in dem ‚ratio‘ begrenzt. Besonders deutlich wird der Unterschied dieser Politikoptionen bei Einsatz mit dem Managementsimulator, da mit dem Advanced-Modell bei Fehleinsparungen die Maluszahlungen so erhöht werden, daß im nächsten Jahr voraussichtlich keine Ökosteuerunterstützung notwendig sein wird (siehe Abbildung 6-26 und Abschnitt 6.3.3).

5.4.10 Bedienungsflächen

Das Modell bietet dem Anwender in beiden Varianten je zwei Bedienungsflächen an, mit denen er in die Entwicklung eingreifen kann. Zu Beginn der Simulation sollten im ‚Scenario Control Center‘ (Abbildung 5-43) die exogenen Rahmenbedingungen festgelegt werden.

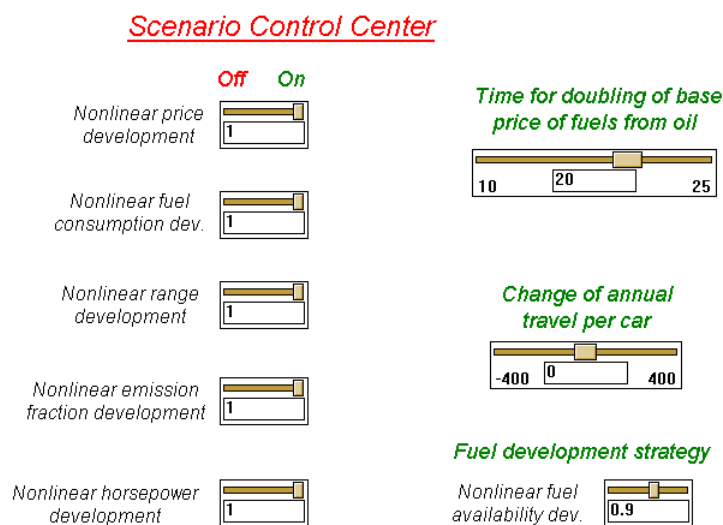


Abbildung 5-43: Das ‚Scenario Control Center‘ zur Festlegung exogener Rahmenbedingungen

Hierzu stehen dem Benutzer auf der linken Seite fünf Schieberegler zum Einschalten der dynamischen Entwicklungen von Fahrzeugeigenschaften zur Verfügung. Diese betreffen die Entwicklungen der Kaufpreise, des Kraftstoffverbrauchs, der Reichweite, der Emissionsanteile und der Motorleistungen. Da die Entwicklung der Emissionsanteile stark mit der Reduktion des Kraftstoffverbrauchs korreliert, ist es sinnvoll, beide Schalter in der gleichen Position zu belassen. Eine weitere exogene Rahmenbedingung, die verändert werden kann, ist die Preisentwicklung der Wareneinstandspreise für Kraftstoffe aus fossilen Rohstoffen. Hierbei wird standardmäßig von einer Verdoppelung der Preise in 20 Jahren ausgegangen. Die Dauer einer Verdoppelung kann mit diesem Schieberegler von 10 bis 25 Jahren eingestellt werden. Auch die jährliche Durchschnittsfahrleistung kann verändert werden. Als Standardwert ist eine konstante Fahrleistung über den gesamten Simulationszeitraum eingestellt. Mit dem Schieberegler kann nun eine jährliche Steigerung oder Verminderung dieser Fahrleistung von bis zu 400 km pro Fahrzeug vorgegeben werden.

Der Schieberegler unten rechts steuert die Umsetzung der alternativen Kraftstoffstrategien. Standardmäßig ist er auf eins gestellt, was bedeutet, daß die Entwicklungsziele und der Ein-

satz von alternativen Kraftstoffen genau so eintreffen werden, wie es in der EU-Richtlinie 2003/30/EG gemäß Abschnitt 3.3.2.2. geplant ist. Dieser Schieberegler kann von Null, also ‚kein Einsatz alternativer Kraftstoffe‘, bis 1,5 verschoben werden. Letzteres bedeutet, daß die Prognosen und Ziele der EU-Richtlinie um den Faktor 1,5 übertroffen werden. Da dieser Schieberegler dieses über die Kraftstoffverfügbarkeitsentwicklung umsetzt, wird auch die Verbreitung von Erdgas-, Hochstrom- und Wasserstofftankstellen entsprechend verstärkt oder abgesenkt.

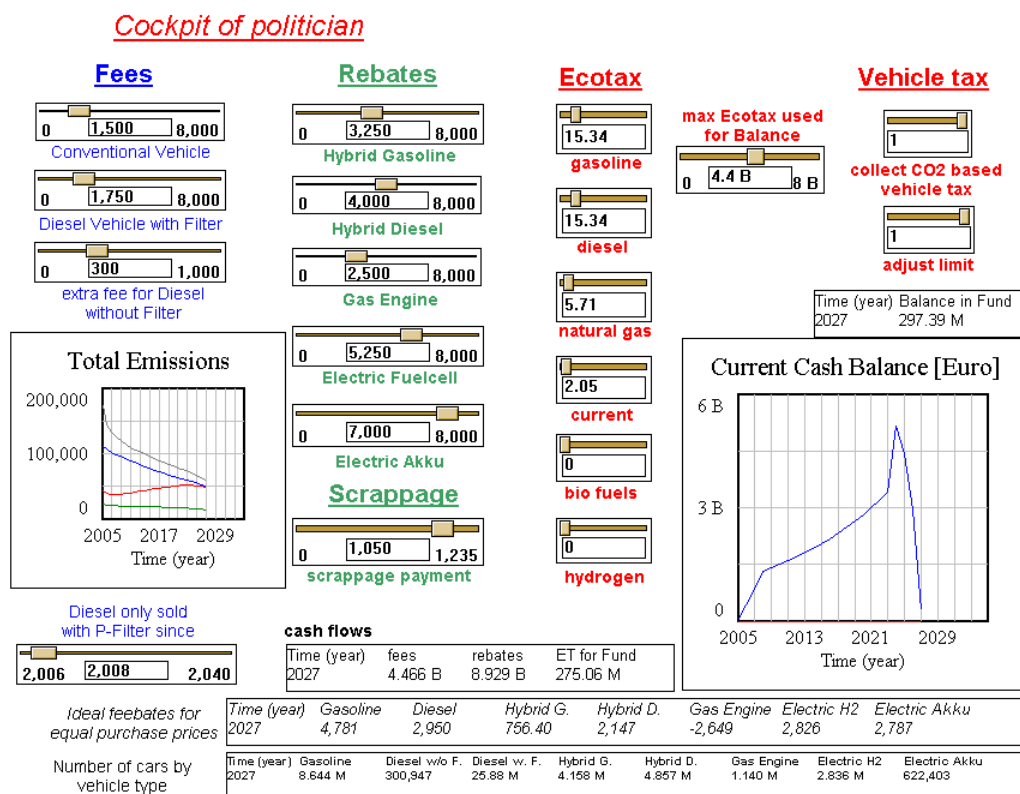


Abbildung 5-44: Das ‚Cockpit of Politician‘ zum Einsatz der umweltpolitischen Instrumente

Nachdem nun die Rahmenbedingungen festgelegt worden sind, kann der Anwender in das ‚Cockpit of Politician‘ steigen (siehe Abbildung 5-44). In diesem Modul kann er den Einsatz aller umweltpolitischen Instrumente steuern und bekommt Informationen über die wichtigsten Entwicklungen durch seine Einflußnahme. In der linken Spalte (blau) kann die Höhe der Maluszahlen für Ottomotor- und Dieselfahrzeuge eingestellt werden. Ihre Höhe reicht von 0 bis 8000 Euro. Mit dem dritten Schieberegler kann die Höhe des zusätzlichen Malus für Diesel ohne Partikelfilter festgelegt werden, der bis zu 1000 Euro betragen kann. Unterhalb des Emissionsdiagramms kann zudem noch das Jahr der serienmäßigen Ausstattung von Dieselfahrzeugen mit einem Partikelfilter eingestellt werden. Standardwert ist hier das Jahr 2008. In der mittleren grünen Spalte können die Bonuszahlungen des Rabattsystems für jeden der fünf geförderten Fahrzeugtypen festgelegt werden. Im untersten Schieberegler dieser Spalte wird die Höhe der Verschrottungsprämie bestimmt. In der ersten roten Spalte auf der rechten Hälfte werden die Steuersätze der Ökosteuern für jede Kraftstoffart eingestellt. Hierbei sind zu Beginn die gültigen Werte aus dem Jahr 2005 eingesetzt. Der Schieberegler links von

den Ökosteuersätzen legt die Obergrenze der Unterstützungszahlungen für den Haushalt aus den Ökosteuerereinnahmen fest. In der rechten roten Spalte kann die Umstellung der Kfz-Steuer auf die CO₂-Emissionsbasis per Schieberegler eingeschaltet werden. Ist dies der Fall, so kann mit dem Regler darunter die Anpassung der Steuerfreiheitsgrenze an den aktuellen technischen Stand zugeschaltet werden, ansonsten hat die Stellung dieses Schalters keine weiteren Auswirkungen.

Damit der Anwender einen schnellen Überblick über die Emissions- und Finanzsituation bekommen kann, sind zwei Diagramme und vier aktive Tabellen im Cockpit integriert. Das linke Diagramm zeigt die Schadstoffemissionen in MT pro Jahr an (blau = CO₂, rot = NO_x, grün = HC, grau = CO). Das rechte Diagramm gibt eine Übersicht über den Haushalt der Bonus- und Maluszahlungen. Das Fenster über dem Diagramm zeigt die aktuelle Haushaltslage an.

Die oberste der drei Tabellen am unteren Rand (cash flows) gibt die jährliche Gesamtsumme der eingenommen Maluszahlungen sowie der ausgezahlten Bonuszahlungen und die gezahlte Unterstützung aus den Ökosteuerereinnahmen wieder. Hiermit kann beispielsweise abgeschätzt werden, ob die Zahlungen angepaßt werden müssen, um den Haushalt ausgeglichen zu gestalten. Die mittlere Tabelle gibt eine Empfehlung über die Höhe der Bonus- und Maluszahlungen ab, um die optimale Lenkungswirkung bezüglich der Kaufpreise zu erhalten. Die Bonus- und Maluszahlungen berechnen sich aus der Differenz zwischen dem aktuellen Kaufpreis und dem angestrebten einheitlichen Kaufpreis von 30.000 Euro pro Fahrzeug. Sie sind jedoch nicht immer umsetzbar, wie beispielsweise bei Erdgasfahrzeugen erkennbar ist. Zudem muß darauf geachtet werden, daß der Haushalt ausgeglichen bleibt. Die unterste Tabelle zeigt die aktuelle Anzahl der Fahrzeuge an – aufgeteilt nach den jeweiligen Fahrzeugtypen.

Zudem stehen dem Benutzer zu weiteren Analysezwecken noch fünf weitere Ansichtsfenster (Displays 1-5) mit ergänzenden Daten zur Verfügung. Im Display 1 werden detaillierte Informationen über die Entwicklung des Fahrzeugbestandes gegeben. In Display 2 werden Informationen über die verschiedenen Emissionsentwicklungen und den gesamten Fahrzeugbestand dargestellt. In Display 3 werden Informationen über den Verlauf der Neuzulassungen bereitgestellt und in Display 4 ein Überblick über die Haushaltsentwicklung und die Höhen der Zahlungen gegeben. In Display 5 sind die Entwicklungen der Wareneinstandspreise für Kraftstoffe, die potentiellen Kraftstoffpreise ausgewählter Kraftstoffe und die Verbrauchsentwicklung der Fahrzeugtypen dargestellt.

Weitere Diagramme und Tabellen für eventuelle Analysezwecke sind bei den entsprechenden Modulen im Modell angesiedelt. Auf sie soll hier jedoch nicht weiter eingegangen werden.

5.4.11 Autopilot für den ‚Management Flight Simulator‘

Mit dem ‚Management Flight Simulator‘ Modell lassen sich verschiedene Szenarien aufgrund variabler exogener Rahmenbedingungen erstellen, sowie die umweltpolitischen Strategien auf ihre Lenkungs- und fiskalischen Wirkungen für verschiedene Politikoptionen durch Variation der Bonus- und Maluszahlungen, der Ökosteuer und der modifizierten Kraftfahrzeugsteuer untersuchen. Ohne weitere Unterstützung ist es indes schwierig, eine eindeutige politische Linie zu verfolgen. Die nun vorgestellten Modellerweiterungen stellen eine Möglichkeit dar, den Regelungskreis zwischen den Steuersätzen und Maluszahlungen sowie den Bonuszahlungen zu schließen.

5.4.11.1 Steuerung der Entscheidungsvariablen

Die Entscheidungsvariablen des ‚Management Flight Simulator‘ werden beim Einsatz des Autopilots nicht mehr oder nur noch teilweise vom Benutzer direkt eingestellt. Dieser gibt vielmehr die politischen Zielsetzungen und Schwerpunkte vor, während der ‚virtuelle Politiker‘ versucht, diese Ziele mit der gegebenen Politik zu erreichen. Die Modellerweiterungen helfen dem Entscheidungsträger, effektiv Erfahrungen über das Systemverhalten zu gewinnen. Mit diesen Erfahrungen ist der Benutzer in der Lage, am Ende den optimalen Kompromiß zwischen der gewünschten Lenkungswirkung für den Einsatz von alternativen Antriebsstrategien und den fiskalischen Auswirkungen zu finden. Daher wird im folgenden von einem Autopiloten für den ‚Management Flight Simulator‘ gesprochen, bei dem ein ‚virtueller Politiker‘ im Sinne der vorgegebenen politischen Ziele handelt.

Wie bei einem Autopiloten in einem Flugzeug, bei dem der Pilot beispielsweise die gewünschte Flughöhe, Steigrate und Fluggeschwindigkeit vorgibt und der Autopilot die direkte Steuerung der Triebwerksleistung, des Höhenruders und der Trimmung übernimmt, so übernimmt hier ein vom Computer simulierter Politiker die direkte Kontrolle über die Entscheidungsvariablen. Hierzu sind jedoch vorher determinierte Strategien und Verhaltensweisen (Politikoptionen) zu definieren, welche im folgenden erläutert werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei Politiken mit Autopilots umgesetzt.

5.4.11.2 Homogene Bonus- und Malusstrategie (Requal-Modell)

Das erste Autopilotmodell baut auf der Flight Simulator Modellvariante ‚Advanced‘ auf. Der Modellanwender hat nun die Möglichkeit, die Gesamtsumme der jährlichen Bonuszahlungen (Total Volume of Rebates) vorzugeben und die Obergrenze der Unterstützungszahlungen für den Haushalt aus den Ökosteuererinnahmen als Anteil dieser Gesamtsumme (ET ratio Fund/Volume) anzugeben. Die Struktur der Autopilotsteuerung für die Bonus- und Maluszahlungen ist in Abbildung 5-45 dargestellt.

Bei der Berechnung der Bonuszahlungen pro Fahrzeug wird ein einheitlicher Betrag angesetzt. Auch bei den Maluszahlungen wird ein einheitlicher Betrag bestimmt, zu dem bei Die-

selffahrzeugen ohne Filter noch der extra Malus addiert wird. Der Betrag darf pro Fahrzeug 5000 Euro Bonuszahlung beziehungsweise 8000 Euro Maluszahlung nicht überschreiten.

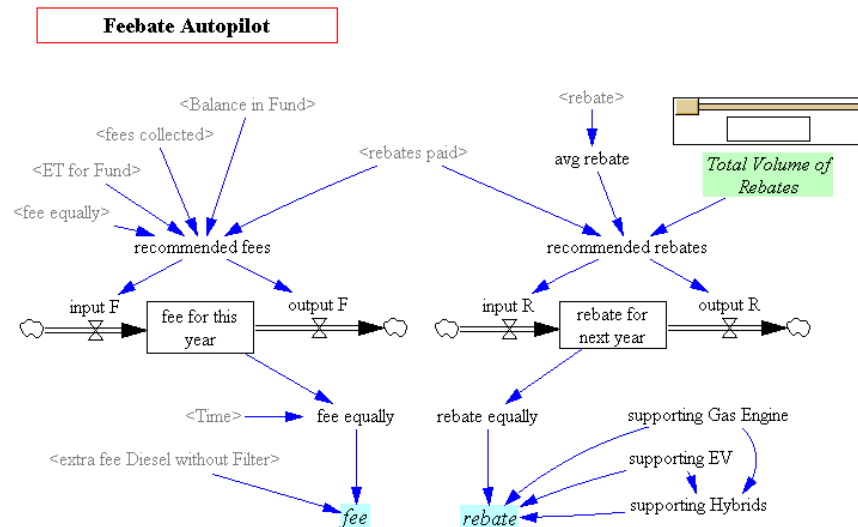


Abbildung 5-45: Die Struktur des Autopiloten zur Regelung der Bonus- und Maluszahlungen

Zunächst wird auf die Berechnung der Höhe der Bonuszahlungen auf der rechten Seite eingegangen. Mit der Formel:

$$(58.) \text{ recommended rebates} = (\text{Total Volume of Rebates} / \text{rebates paid}) * \text{avg rebate}$$

wird zunächst das Verhältnis zwischen der angestrebten Summe der Bonuszahlungen und der Gesamtsumme der erfolgten Zahlungen bestimmt und dieses dann mit dem durchschnittlichen Bonus pro Fahrzeug (avg rebate) multipliziert. Hieraus ergibt sich die empfohlene (durchschnittliche) Höhe für das kommende Jahr (rebate for next year). Mit der Verzögerungsfunktion ‚Delay Information‘ wird die Information über die Höhe des Betrages gespeichert und verläßt den Speicher nach einem Zeitschritt wieder. Die Formel:

$$(59.) \text{ rebate for next year} = \text{DELAY INFORMATION} (\text{input R}, 1, \text{output R})$$

beschreibt diesen Speicher. Hierbei wird der berechnete Bonusbetrag sowohl für den Zufluß (input R) als auch für den Abfluß (output R) nach einem Zeitschritt eingesetzt. Dieser Rabatt wird dann durch die Formel:

$$(60.) \text{ rebate equally} = \text{ACTIVE INITIAL} (\text{IF THEN ELSE}(\text{rebate for next year} > 5000, 5000, \text{rebate for next year}), 5000)$$

auf die maximale Höhe von 5000 Euro begrenzt. Als ‚Active Initial‘ Variable kann hier auch der Anfangswert für die Simulation eingegeben werden. Dieser entspricht der Höchstgrenze von 5000 Euro. Bei der Übertragung in die Variable ‚rebate‘ wird nun berücksichtigt, daß nur den geförderten Fahrzeugtypen dieser Bonus zugute kommt. Zudem besteht die Möglichkeit, mit Hilfe der drei Faktorvariablen ‚supporting Gas Engine‘, ‚supporting EV‘ und ‚supporting

Hybrids' die durchschnittliche Höhe der Bonuszahlungen zugunsten der entsprechenden Antriebsvarianten zu verschieben, indem diese mit den entsprechenden Faktorvariablen multipliziert werden. Hierbei berechnet sich der Faktor für die Hybridfahrzeuge mit der Formel:

$$(61.) \text{ supporting Hybrids} = 1/(\text{supporting EV} * \text{supporting Gas Engine})$$

aus den anderen beiden Faktoren. Der Standardwert der Faktoren ist auf eins gesetzt. Aus der Höhe der sich ergebenden Bonuszahlungen pro Fahrzeug (rebate) wird nun wieder die durchschnittliche Höhe der Bonuszahlungen (avg rebate) berechnet und der erste Regelkreis ist geschlossen.

Auf der linken Seite hingegen wird die Höhe der Maluszahlungen pro Fahrzeug berechnet, aus denen die Bonuszahlungen abzüglich der aktuellen Zahlungen aus der Ökosteuer und dem Guthaben des Haushaltes gedeckt werden sollen, so daß als Zielgröße wieder der Anfangsbestand von 75 Millionen Euro erreicht wird. Sie werden mit der Formel:

$$(62.) \text{ recommended fees} = ((\text{rebates paid} - \text{ET for Fund} - \text{Balance in Fund} + 7.5e+007) / \text{fees collected}) * \text{fee equally}$$

abgeschätzt. Um keine Fehlermeldung in Vensim aufgrund von simultaner Verwendung von Gleichungen auszulösen, muß der Betrag ebenfalls einen Speicher mit der Verzögerungsfunktion ‚Delay Information‘ durchlaufen, jedoch wird dieses Mal die Verzögerungszeit auf null gesetzt.

$$(63.) \text{ fee for this year} = \text{DELAY INFORMATION} (\text{input } F, 0, \text{output } F)$$

Analog zu den Bonuszahlungen wird im nächsten Schritt (Fees equally) die maximale Höhe der Maluszahlungen auf 8000 Euro begrenzt und auf die mit einem Malus belegten Fahrzeugtypen (fee) angewendet. Hierbei wird bei den Dieselfahrzeugen ohne Partikelfilter noch der extra Malus hinzugefügt. Nun ist auch dieser Regelkreis geschlossen.

5.4.11.3 Lenkungswirkungsbezogene Bonus- und Malusstrategie (Ropt-Modell)

In dieser Arbeit wird eine weitere Variante des Autopilot-Modells untersucht. Im Gegensatz zu dem bisherigen Modell wird hierbei die Bonuszahlung nicht homogen auf Basis der gesamten Fördermittel, sondern entsprechend der Kaufpreisentwicklung der Fahrzeugtypen festgelegt. Der Gesetzgeber soll damit die Lenkungswirkung der Bonuszahlungen nutzen, um die (noch) sehr stark divergierenden Kaufpreise der unterschiedlichen Fahrzeugtypen mittelfristig zusammenzuführen. Die modifizierte Struktur im ‚Feebate‘-Autopiloten ist in Abbildung 5-46 dargestellt.

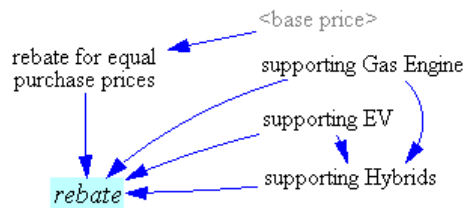


Abbildung 5-46: Bestimmung der Bonushöhe im Ropt-Modell

Der Bonus für die Kaufpreisgleichheit berechnet sich mit der Formel:

$$(64.) \text{ rebate for equal purchase prices}[\text{vehicle types}] = \text{IF THEN ELSE}(\text{base price}[\text{vehicle types}] - 30000 < 0, 0, \text{IF THEN ELSE}(\text{base price}[\text{vehicle types}] - 30000 > 8000, 8000, \text{base price}[\text{vehicle types}] - 30000)).$$

Die äußere Schleife sorgt dafür, daß nur dann Bonuszahlungen erfolgen, wenn der Einheitspreis von 30.000 Euro von dem jeweiligen Fahrzeugtyp noch nicht erreicht worden ist. Die innere Schleife begrenzt die maximale Bonuszahlung auf die Obergrenze von 8000 Euro.

Die Höhe der Maluszahlungen wird nach der Ermittlung der einheitlichen Malushöhe (fee equally) anteilmäßig entsprechend der Kaufpreisdifferenz bezüglich des angestrebten Einheitspreises (fee for equal purchase price) gewichtet (fee ratio) und entsprechend aufgeteilt. Die modifizierte Struktur ist in Abbildung 5-47 dargestellt.

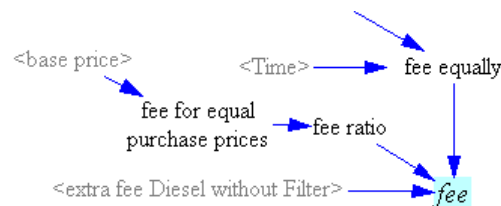


Abbildung 5-47: Bestimmung der Malushöhe im Ropt-Modell

Die Höhe des Gewichtungsfaktors berechnet sich mit der Formel:

$$(65.) \text{ fee ratio}[\text{Gasoline}] = (2 * \text{fee for equal purchase prices}[\text{Gasoline with Filter}]) / (\text{fee for equal purchase prices}[\text{Gasoline}] + \text{fee for equal purchase prices}[\text{Diesel with Filter}])$$

für konventionelle Ottomotorfahrzeuge und mit der Formel

$$(66.) \text{ fee ratio}[\text{Diesel with Filter}] = (2 * \text{fee for equal purchase prices}[\text{Diesel}]) / (\text{fee for equal purchase prices}[\text{Gasoline}] + \text{fee for equal purchase prices}[\text{Diesel with Filter}])$$

für konventionelle Dieselmotorfahrzeuge. Der jeweilige Faktor wird mit der einheitlichen Malushöhe multipliziert und ergibt somit den fahrzeugtypespezifisch erhobenen Malus. Bei Dieselfahrzeugen ohne Partikelfilter wird noch der zusätzlich Malus addiert.

5.4.11.4 Strategie und Präferenzmodell der Ökosteuersatzanpassung

Auch zur Anpassung der Ökosteuer wird eine automatische Steuerung eingeführt. Der Benutzer beeinflusst manuell lediglich noch den Ökosteuersatz für Wasserstoff. Nach Ablauf der Steuerbefreiung von Biokraftstoffen im Jahr 2009 (siehe Abschnitt 3.3.4) wird der Steuersatz auf 3 Cent pro Liter angehoben. In Abbildung 5-48 sind der strukturelle Aufbau und ein typischer Verlauf der Ökosteuersätze dargestellt.

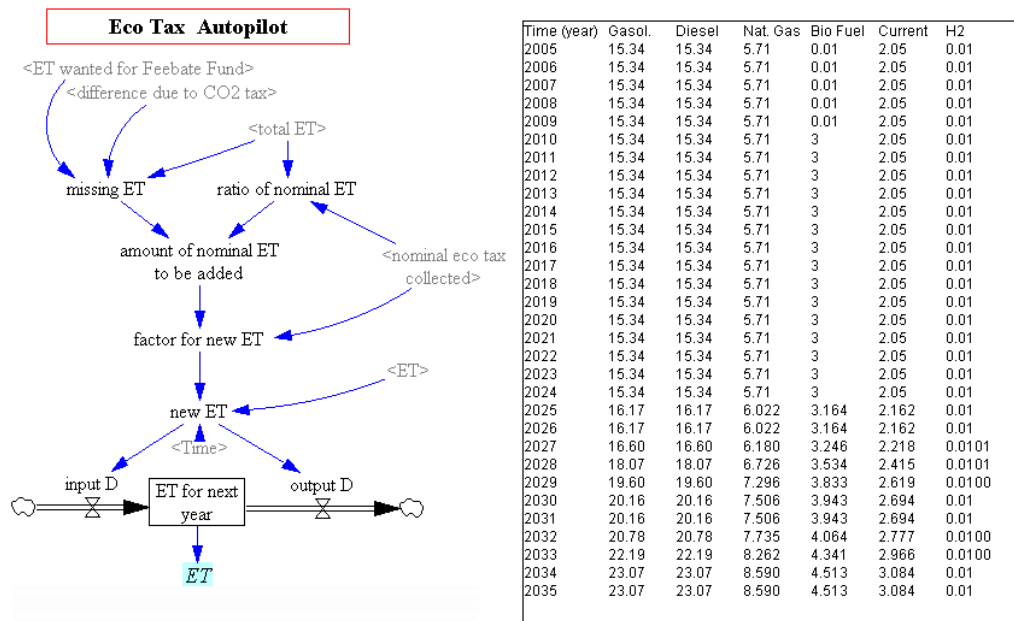


Abbildung 5-48: Struktureller Aufbau des Ökosteuer-Autopiloten und ein typischer Verlauf der Steuersätze

Zur Bestimmung der Ökosteueranpassung werden die folgenden Berechnungsschritte durchgeführt. Zuerst wird der Betrag der fehlenden Ökosteuerereinnahmen (missing ET) berechnet. Mit der Formel:

$$(67.) \text{ missing ET} = \text{IF THEN ELSE}(\text{difference due to CO}_2 \text{ tax} + \text{total ET} - \text{ET wanted for Feebate Fund} < 0, \text{ABS}(\text{difference due to CO}_2 \text{ tax} + \text{total ET} - \text{ET wanted for Feebate Fund}), 0)$$

wird dieser Betrag gemäß der folgenden Entscheidungsregeln festgelegt. Übersteigen die Zahlungen für die Einnahmeeinbußen durch die Kfz-Steuerumstellung ($\text{difference due to CO}_2 \text{ tax}$) und die angeforderten Unterstützungszahlungen ($\text{ET wanted for Feebate Fund}$) die Ökosteuerereinnahmen (total ET), so ist dieser negative Saldo aus Einnahmen der gesuchte Betrag (missing ET). Liegen zu geringe Einnahmen vor, so wird im nächsten Schritt die Höhe der einzelnen Steuersatzanhebungen bestimmt. Mit der Formel:

$$(68.) \text{ ratio of nominal ET}[\text{fuel types}] = \text{nominal eco tax collected}[\text{fuel types}] / \text{total ET}$$

wird der Anteil der jeweiligen Ökosteuerereinnahmen einer Kraftstoffart bezogen auf die Gesamteinnahme berechnet. Durch Multiplikation mit dem negativen Saldo der Einnahmen wird

diese Differenz anteilmäßig auf jede Kraftstoffart verteilt (amount of nominal ET to be added). Die Formel lautet:

$$(69.) \text{ Amount of nominal ET to be added[fuel types]} = (\text{nominal eco tax collected[fuel types]} / \text{total ET}) * \text{missing ET}.$$

(69) in Formel (70) eingesetzt, ergibt (71) und vereinfacht (72):

$$(70.) \text{ factor for new ET[fuel types]} = 1 + (\text{amount of nominal ET to be added[fuel types]} / \text{nominal eco tax collected[fuel types]})$$

$$(71.) 1 + \text{nominal eco tax collected[fuel types]} / \text{total ET}) * (\text{missing ET} / \text{nominal eco tax collected[fuel types]})$$

$$(72.) 1 + (\text{missing ET} / \text{total ET})$$

Mit der Formel wird für jede Kraftstoffart der Faktor bestimmt, mit dem der bisherige Steuersatz (ET) multipliziert werden soll. Die auf diese Weise bestimmten neuen Ökosteuersätze (new ET), bei denen auch die Anhebung des Steuersatzes für Biokraftstoffe im Jahr 2010 auf 3 Cent pro Liter enthalten ist, werden systembedingt über einen Speicher mit der Verzögerungsfunktion ‚Delay Information‘ und der Verzögerungszeit Null als aktuelle Ökosteuersätze ausgegeben. (ET). Somit ist auch an dieser Stelle ein geschlossener Regelkreislauf entstanden.

5.4.11.5 Berücksichtigung des Einflusses von TIME STEP

Damit die Steuerungsautomatismen des Autopiloten schnell genug reagieren, um ein ‚Aufschwingen‘ zu vermeiden, sollte die Konstante ‚TIME STEP‘ kleiner als ein Drittel der kleinsten zeitabhängigen Konstanten sein [Kirkwood 1998, S.56]. Im Modell werden alle Anpassungen einmal jährlich vorgenommen, so daß alle Werte ab 0,33 für ‚TIME STEP‘ in Frage kommen. Die Variation der Konstante ‚TIME STEP‘ beeinflusst jedoch den Gesamtbestand der Fahrzeuge im Laufe der Simulation. Bei Verkleinerung des Wertes für ‚TIME STEP‘ verringert sich der Gesamtbestand der Fahrzeuge, wie in Abbildung 5-49 ersichtlich. Da dieser jedoch weitestgehend identisch mit denjenigen in den Flight Simulator Modellen sein soll, bei denen ‚TIME STEP‘ den Wert 1 besitzt, wird eine Korrektur vorgenommen. Als Ursache für die Reduzierung des Fahrzeugbestandes werden die Variablen für die natürliche Stilllegungsrate (natural retirement rate) in den jeweiligen Klassen der Alterungskette im Fahrzeugsektor identifiziert. Durch Multiplikation mit einem Korrekturfaktor kann die natürliche Stilllegungsrate jeder Altersklasse so modifiziert werden, daß der Verlauf des Gesamtfahrzeugbestandes ausreichend genau korrigiert wird. Auch die Anfangswerte der kombinierten Löschungsrate (retirement rate) müssen zunächst angepaßt werden, was durch Multiplikation der Anfangswerte mit dem Wert für ‚TIME STEP‘ geschieht. Bei Variation des Wertes der Konstanten ‚TIME STEP‘ zeigen sich die in den Abbildung 5-49 und 5-50 dargestellten Abhängigkeiten

zwischen dem benötigten Korrekturfaktor für die natürliche Stilllegungsrate und ‚TIME STEP‘.

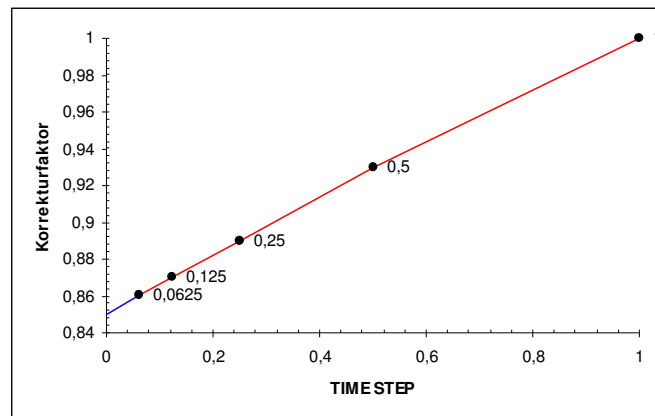


Abbildung 5-49: Zusammenhang zwischen TIME STEP und Korrekturfaktor

Hieraus läßt sich mit Hilfe der linearen Einfachregression der lineare Zusammenhang durch eine Regressionsfunktion bestimmen, so daß sich der Korrekturfaktor mit der Formel:

$$(73.) \text{ Korrekturfaktor} = 0,85 + 0,15 * \text{TIME STEP}$$

berechnen läßt. Der Regressionskoeffizient beträgt 0,15 und die Konstante 0,85. Diese Formel wird an entsprechender Stelle (retirement rate) in der Alterungskette eingeführt. Damit ergibt sich der in Abbildung 5-50 dargestellte korrigierte Verlauf des Gesamtfahrzeugbestandes.

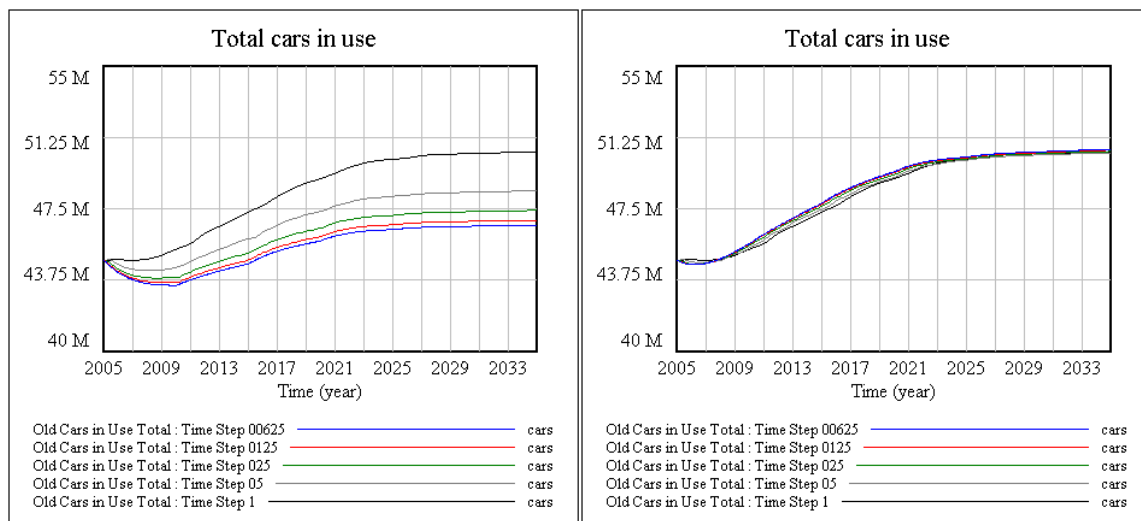


Abbildung 5-50: Gesamtfahrzeugbestand in Abhängigkeit von der Variablen ‚TIME STEP‘ vor und nach erfolgter Korrektur

In dieser Arbeit wird bei der Berechnung der Szenarien mit Autopiloten der Wert 0,125 für die Konstante ‚TIME STEP‘ gewählt, da dieser Wert einen guten Kompromiß zwischen Steuerungspräzision des Autopiloten und der resultierenden Datenmenge darstellt.

5.4.12 Eingriffspunkte in die Autopilotfunktion (neue Bedienungsoberfläche)

Entsprechend der modifizierten Eingriffsmöglichkeiten des Benutzers wird die Bedienungs-oberfläche des ‚Cockpit of politician‘ angepaßt, wie in Abbildung 5-51 ersichtlich.

Alle beschriebenen Eingriffspunkte sind über diese Schnittstelle beeinflussbar. Der gewünschte Gesamtumfang an Fördermitteln als Zielgröße kann eingestellt werden (Total Volume of Rebates), ebenso wie die Obergrenze der maximalen Bezuschussung des Haushaltes durch Ökosteuereinnahmen im Verhältnis zu den Förderungsmitteln (ET ratio Fund / Volume). Bei den Maluszahlungen kann lediglich noch die Höhe des Filtermalus und bei den Ökosteuersätzen die Höhe des Wasserstoffsteuersatzes manuell eingestellt werden. Bleiben diese Eingriffspunkte konstant über den Simulationszeitraum, so kann die Simulation vollständig automatisch, ohne manuellen Eingriff durchgeführt werden, da der Instrumenteneinsatz gemäß den Vorgaben des Autopiloten durchgeführt wird.

Bei dem Autopiloten-Modell ‚Ropt‘ kann der Gesamtumfang an Fördermitteln nicht manuell beeinflusst werden, da er sich automatisch durch die Orientierung der Bonuszahlungen an den Kaufpreisen der Fahrzeuge ergibt.

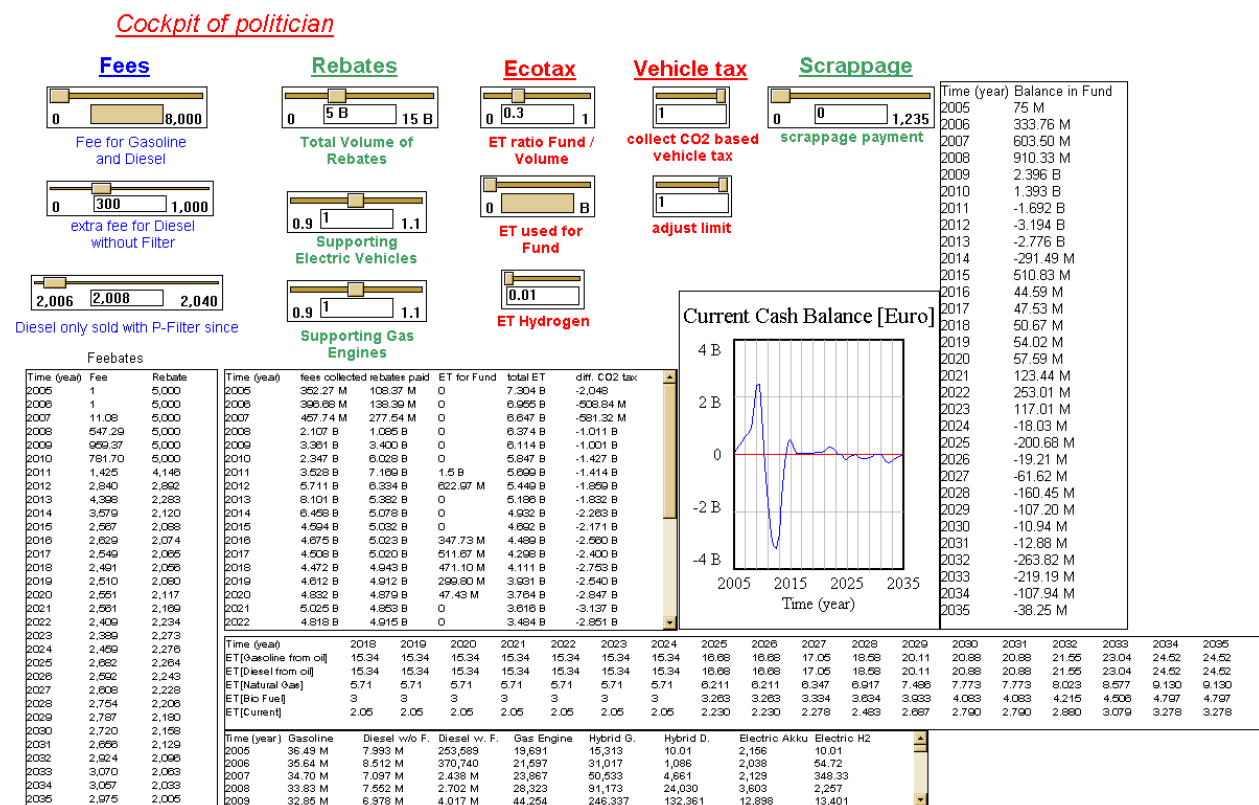


Abbildung 5-51: Das ‚Cockpit of politician‘ in der Autopilot-Version

Das Diagramm zeigt den Verlauf des Haushaltes der Bonus- und Maluszahlungen (Current Cash Balance) an, welcher in der Tabelle rechts des Diagramms in Zahlenwerten dargestellt wird. Die Tabelle links des Diagramms listet die akkumulierten Maluseinnahmen (fees collected) und Bonuszahlungen (rebates paid), sowie die erhaltenen Zuschüsse aus den Öko-

steuereinnahmen (ET for Fund), deren Gesamtaufkommen (total ET) und den Differenzbetrag durch die Kfz-Steuerungstellung (diff. CO2 tax) auf. Die Tabelle am linken Rand stellt die durchschnittlichen Malus- und Bonuszahlungen pro Fahrzeug dar. Die erste Tabelle unterhalb des Diagramms zeigt die Ökosteuersätze an und hält ihre Werte ab dem Jahr 2018 fest. Die Tabelle am unteren Rand zeigt die Entwicklung des Fahrzeugbestandes auf – untergliedert in die verschiedenen Fahrzeugtypen.

5.5 Modellstruktur für den japanischen Automobilmarkt

5.5.1 Automobilsteuern in Japan

Der japanische Gesetzgeber erhebt auf Kraftstoffe unterschiedlich hohe Steuern. Daraus ergeben sich Vor- und Nachteile zwischen unterschiedlichen Fahrzeugtypen. Die Kraftstoffsteuer setzt sich in Japan aus der Mineralölsteuer MOT (Mineral Oil Tax) und der – auf die Summe aus Grundpreis und Mineralölsteuer aufzuschlagenden – Mehrwertsteuer VAT (Value Added Tax) von fünf Prozent zusammen.

Der japanische Staat besteuert Benzin mit einer 'gasoline tax' (48,6 JPY/l) und einer 'regional road tax' (5,2 JPY/l). Für Dieselmotorkraftstoff muß der japanische Konsument die sogenannte 'Diesel Handling Tax' in Höhe von 32,1 JPY/l entrichten. Flüssiggas (LPG) versteuert der Gesetzgeber in Japan mit 17,5 JPY/kg, wobei das japanische Modell keine LPG-Fahrzeuge betrachtet. Auf CNG und Strom ist in Japan nur die Mehrwertsteuer zu entrichten. Seit 1993 ist die Mineralölsteuer für alle Kraftstoffe relativ konstant (Stand 9.06.2005) [JAMA 2004a, S. 59]. Tabelle 5-20 faßt die Kraftstoffsteuern zusammen:

Tabelle 5-19: Kraftstoffsteuern in Japan [Eigene Berechnungen nach JAMA 2004a, S: 59]

	Super (JPY/l)	Diesel (JPY/l)	Erdgas (JPY/l)	Strom (JPY/kWh)
Grundpreis	74,77	48,85	52,38	16,67
Mineralölsteuer	53,8	32,1		
Umsatzsteuer (5%)	6,43	4,15	2,62	0,83
Anteil Steuern	60,23	36,15	2,62	0,83
Abgabepreis	135	85	55	17,5

Im Japan-Modell werden die Kraftstoffsteuern im Modul 'collected fuel tax calculation' berechnet. Hierbei wird noch eine Ökosteuer ET (ecotax) als Verbrauchssteuer hinzugefügt und als Gaming-Variable hinterlegt, deren Einführung in Japan Gegenstand der Diskussion ist [VTT 2006, S. 8]. Mit der folgenden Gleichung kann die Kraftstoffsteuer pro Mengeneinheit (,tax rate') für jeden Fahrzeugtyp errechnet werden:

$$(74.) \text{ tax rate} = \text{VAT}[\text{vehicle types}] * (\text{initial average fuel cost before tax}[\text{vehicle types}] + \text{MOT}[\text{vehicle types}] + \text{ET}[\text{vehicle types}]) + \text{MOT}[\text{vehicle types}] + \text{ET}[\text{vehicle types}].$$

Durch die Multiplikation der Kraftstoffsteuer mit der jährlichen Fahrleistung und dem Kraftstoffverbrauch pro Kilometer ergibt sich das Steueraufkommen (nominal fuel tax collected) für jeden Fahrzeugtyp:

$$(75.) \text{ nominal fuel tax collected} [\text{vehicle types}] = \text{tax rate}[\text{vehicle types}] * \text{annual travel}[\text{vehicle types}] * \text{average fuel consumption}[\text{vehicle types}] * 0.01.$$

Die Höhe der Steuervergünstigung ist sowohl von der umweltfreundlichen Einordnung des Fahrzeugs, als auch von der Höhe der zu entrichtenden Automobilsteuer abhängig. Der Besitz-

zer eines sogenannten 2-Sterne LEVs erhält beispielsweise für zwei Jahre einen Steuernachlaß von 25 Prozent auf die Automobilsteuer (siehe Abschnitt 3.3.4.4). Die Höhe der Automobilsteuer ergibt sich aus der Motorgröße des Fahrzeugs. Tabelle 5-21 gibt einen Überblick über die in Japan jährlich zu zahlende Automobilsteuer in Abhängigkeit von der Motorengröße.

Tabelle 5-20: Japanische Automobilsteuer in Abhängigkeit von der Motorengröße [JAMA 2002, S. 10]

Motorengröße	Jährliche Automobilsteuer
661 – 1000cc	29.500Yen/Jahr
1001 – 1500cc	34.500Yen/Jahr
1501 – 2000cc	39.500Yen/Jahr
2001 – 2500cc	45.000Yen/Jahr
2501 – 3000cc	51.000 Yen/Jahr
3001 – 3500cc	58.000 Yen/Jahr
3501 – 4000cc	66.500 Yen/Jahr
4001 – 4500cc	76.500Yen/Jahr
4501 – 6000cc	88.000Yen/Jahr
>6001cc	111.000Yen/Jahr

Für eine einfache und übersichtliche Implementierung des japanischen Steueranreizsystems in das Prognosemodell werden die ‚Low Emission Vehicle (LEV)‘ in die drei Hubraumklassen ‚small‘ (661-1500ccm), ‚medium‘ (1501-2500ccm) und ‚large‘ (2500-6000ccm) eingeteilt. Die Grenzen der Klassen wurden auf Grundlage einer gleichmäßigen Verteilung des Referenzfahrzeugbestandes von Toyota bestimmt. Für diese Klassen läßt sich ein Mittelwert der zugehörigen Automobilsteuer berechnen. Tabelle 5-22 zeigt die Klassifizierung der LEVs nach Motorgröße und die dazugehörige Automobilsteuer.

Tabelle 5-21: Klassifizierung der ‚Low Emission Vehicles‘ nach Motorengröße [Eigene Berechnungen nach JAMA 2002, S. 10]

Bezeichnung	Motorgröße	Jährliche Automobilsteuer
Small	661 – 1500ccm	32.000Yen/ Jahr
Medium	1501 – 2500ccm	42.250Yen/ Jahr
Large	2501 – 6000ccm	68.000Yen/ Jahr

Die auch als sogenannte ‚clean energy vehicles‘ bezeichneten LEVs sind aufgrund der neueren Technik und geringeren Marktdurchdringung teurer als konventionelle Fahrzeuge. Deshalb gibt der japanische Staat zusätzlich zur reduzierten Automobilsteuer mit dem Rabatt auf die ‚acquisition tax‘ (Anschaffungssteuer) einen weiteren Anreiz zum Kauf eines LEVs.

5.5.2 Anpassung der Fahrzeugeigenschaften

Das japanische Modell erweitert das kalifornische Modell um die im ‚green tax system‘ definierten ‚Low Emission Vehicles (LEV)‘ und definiert die voneinander abweichenden Ausprägungen der Fahrzeugtypen (vehicle type) mit Hilfe der oben erläuterten Indexvariablen

‚subscript‘. Dieselfahrzeuge finden im Modell Berücksichtigung; dagegen erfolgt keine Betrachtung der mit Methanol betriebenen Fahrzeuge.¹⁶⁴

5.5.2.1 Referenzmodus Toyota

Als Referenz für die als ‚LEV‘ bezeichneten umweltfreundlichen Benzinfahrzeuge dient die Fahrzeugflotte des japanischen Herstellers ‚Toyota‘. Toyota hat in Japan einen Marktanteil von etwa 40 Prozent. Darüber hinaus liegen ausreichend disaggregierte Daten (Modell, Antrieb) vor. Die Simulationen beginnen im Jahr 2001 mit einem Anfangswert von 1.451.709 Neuzulassungen. Davon sind etwa 25 Prozent Benzinfahrzeuge mit ‚herkömmlichem‘ Ottomotor (Gasoline 0). Der Anteil an ‚Low Emission Vehicles‘ liegt bei 72 Prozent. Hybridfahrzeuge haben einen Anteil von einem Prozent. Die Angaben von Toyota finden sich als Anfangswerte für Neuzulassungen (initial sales) und für Marktverteilung (initial real market shares) in Tabelle 5-23. Im ‚green tax system‘ (siehe Tabelle 3-5 in Abschnitt 3.3.4.4) erhält der Fahrzeugbesitzer abhängig von der Klassifizierung seines Fahrzeugs als ‚Low Emission Vehicle (LEV)‘ unterschiedlich hohe Vergünstigungen auf die Automobilsteuer (‚automobile tax‘). Diese Rabatte sind mit unterschiedlichen Sternekategorien gekennzeichnet. Hybrid-, Erdgas- und Elektrofahrzeuge werden zusätzlich einmalig mit einer Reduzierung der Anschaffungssteuer (‚acquisition tax‘) begünstigt [Nozaki 2005].

Tabelle 5-22: PKW-Neuzulassungen im Jahr 2001 nach Fahrzeugtyp [Eigene Berechnungen]

Fahrzeugtyp	Neuzulassungen in Stk.	Marktanteil in Prozent
Gasoline 0	372.211	25,79
Electric	56	0,004
Hybrid	10.982	0,76
CNG	19	0,001
Diesel	4.450	0,31
Small One Star LEVs	495.035	34,29
Small Two Star LEVs	105	0,01
Small Three Star LEVs	1.843	0,13
Medium One Star LEVs	426.063	29,52
Medium Two Star LEVs	100	0,01
Medium Three Star LEVs	13.202	0,91
Large One Star LEVs	81.545	5,56
Large Two Star LEVs	1.574	0,11
Large Three Star LEVs	36.319	2,52
Total	1.443.504	100,00

Ausgehend von den Fahrzeugtypen in Tabelle 5-22 und analog zu Abschnitt 5.4.7 erfolgt nun die Anpassung der Fahrzeugeigenschaften an den japanischen Markt. Im Gegensatz zum deutschen Modell erfolgt die Anpassung jedoch anhand der Fahrzeugtypen und nicht an den

¹⁶⁴ Als Begründung ist zum einen die hohe Importabhängigkeit – vergleichbar mit der von Erdöl – anzuführen (z.B. Brasilien). Zum anderen sind die Absatzzahlen von 2001 bis 2003 mit Null angegeben. Schließlich steht für die Untersuchung kein Referenzfahrzeug zur Verfügung.

Modulen, da im japanischen Modell die Entwicklung der LEV-Kategorie im Mittelpunkt der Betrachtung steht.

Der durchschnittliche Basispreis herkömmlicher Benzinfahrzeuge (Gasoline 0) beträgt 2.511.648 Yen. Dieser Fahrzeugtyp erhält keine Steuervergünstigungen. Die Durchschnittsleistung eines PKW mit Ottomotor beträgt 89 kW, der durchschnittliche Verbrauch 13l/100km. Die Reichweite liegt bei rund 760 Kilometern. Die Kraftstoffverfügbarkeit (Tankstelleninfrastruktur) beträgt 100 Prozent, da Superbenzinkraftstoff an jeder Tankstelle verfügbar ist. In Japan kostet ein Liter Superbenzin etwa 135 Yen (Stand 9.06.2005). Davon sind 48,6 Yen Benzinsteuern (gasoline tax), 5,2 Yen regionale Steuer ('regional road tax') und 5 Prozent Umsatzsteuer (consumption tax) [JAMA 2004a, S. 59]. Abzüglich der Steuern ergibt sich ein Nettopreis von 74,8 Yen pro Liter Superbenzinkraftstoff. Bei einem Verbrauch von 0,13 l/km ergeben sich Kraftstoffkosten von 9,7 Yen/km. Der durchschnittliche CO₂-Emissionswert für japanische Benzinfahrzeuge liegt damit bei 302 g/km. Tabelle 5-24 faßt die gesammelten Daten über die Fahrzeugeigenschaften von herkömmlichen Benzinfahrzeugen zusammen.

Tabelle 5-23: Attributdaten von ‚herkömmlichen‘ Benzinfahrzeugen [Eigene Berechnungen]

Preis (Yen)	Leistung (kW)	Verbrauch (l/100km)	Reichweite (km)	Infrastruktur (%)	Kosten pro l (Yen)	Kosten pro km (Yen)	CO ₂ (g/km)
2.511.648	89	13	760	100	74,8	9,7	302

Die Kraftstoffverfügbarkeit der LEVs beträgt genau wie bei herkömmlichen Benzinfahrzeugen 100 Prozent, die Reichweite liegt bei 760 km und die Berechnung der Kraftstoffkosten erfolgt genau wie bei den ‚herkömmlichen‘ Benzinfahrzeugen (Gasoline 0). Die anderen Daten lassen sich mit Hilfe des Referenzbestandes ermitteln. Hierbei werden die berechneten Mittelwerte für die einzelnen Fahrzeugtypen mit den jeweiligen Verkaufszahlen gewichtet. Die Motorleistung bestimmt sich – unabhängig von der Sterne-Kategorisierung – für die drei festgelegten Hubraumklassen. Tabelle 5-25 faßt die Attributdaten der LEVs zusammen:

Tabelle 5-24: Attributdaten der ‚umweltfreundlichen‘ Benzinfahrzeuge (Referenzbestand Toyota) [Eigene Berechnungen]

Fahrzeugtyp	Preis (Yen)	Leistung (kW)	Verbrauch (l/100km)	Reichweite (km)	Infrastruktur (%)	Kosten pro l (Yen)	Kosten pro km (Yen)	CO ₂ (g/km)
Small								
*LEV	1.382.316	72	6,33	760	100	74,77	4,74	147
**LEV	1.391.435	72	5,74	760	100	74,77	4,29	133
***LEV	1.374.397	72	5,66	760	100	74,77	4,23	131
Medium								
*LEV	2.430.779	110	7,64	760	100	74,77	5,71	177
**LEV	2.149.663	110	7,79	760	100	74,77	5,82	181
***LEV	2.177.414	110	7,64	760	100	74,77	5,72	177
Large								
*LEV	3.711.191	161	10,63	760	100	74,77	7,95	247
**LEV	3.128.305	161	11,47	760	100	74,77	8,58	266
***LEV	5.924.980	161	10,95	760	100	74,77	8,19	254

Die Anpassung der Fahrzeugeigenschaften von Hybridantrieben erfolgt am Beispiel des Toyota Prius (siehe Abschnitt 2.3.6). Der durchschnittliche Neuwagenpreis beträgt 2.268.469 Yen. Im Rahmen des ‚green tax system‘ stuft der japanische Staat die Kombination aus Elektro- und Benzinmotor als ‚Ultra Low Emission Vehicle (ULEV)‘ ein. Mit einem Hubraum von 1496ccm sind für den ‚Prius‘ 32.000 Yen an Automobilsteuern zu zahlen. Das Modell hat einen Ottomotor mit 56kW. Der Verbrauch liegt bei 3,3 l/100km. Damit erreicht er bei einem Tankinhalt von 45 Litern eine Reichweite von ungefähr 1350 Kilometern. Die Kraftstoffverfügbarkeit beträgt genau wie bei herkömmlichen Benzinfahrzeugen 100 Prozent. Die bereits errechneten Kraftstoffkosten gelten auch für Hybridfahrzeuge. Bei einem Verbrauch von 3,3 l/100km ergeben sich pro Kilometer Kosten von etwa 2,49 Yen und ein CO₂-Ausstoß von 77,4g/km. Tabelle 5-26 gibt eine Übersicht der Fahrzeugeigenschaften von Hybridantrieben:

Tabelle 5-25: Attributdaten von Hybridfahrzeugen [Eigene Berechnungen]

Preis (Yen)	Leistung (kW)	Verbrauch (l/100km)	Reichweite (km)	Infrastruktur (%)	Kosten pro l (Yen)	Kosten pro km (Yen)	CO ₂ (g/km)
2.268.469	56	3,3	1350	100	74,77	2,49	77,4

Im kalifornischen Modell wird der Basispreis eines Elektrofahrzeugs mit 25.000 US-Dollar angenommen, die nach einem Kurs von Juni 2005 etwa 3.300.000 Yen entsprechen. Die Leistung eines elektrisch betriebenen Fahrzeugs mit einer Nickel-Metallhydrid-Batterie beträgt 49kW. Der charakteristische Netzenergieverbrauch liegt bei 26kWh/100km. Der Bezug einer Kilowattstunde Strom kostet in Japan 17,5 Yen (Stand 9.06.2005). Abzüglich der 5 Prozent Umsatzsteuer ergibt sich ein Strompreis vor Steuern von 16,67 Yen/kWh. Bei einem Verbrauch von 0,26 kWh entstehen damit Kosten in Höhe von 4,33 Yen/km. Die Reichweite von Elektrofahrzeugen beträgt nach der Studie aus Kalifornien 161 Kilometer. Das Fehlen einer ausgebauten Tankstelleninfrastruktur für Elektrofahrzeuge sowie die lange Ladezeit sprechen für die Annahme einer Kraftstoffverfügbarkeit von 0 Prozent. Elektrofahrzeuge verursachen

keine 'direkten' Emissionen, so daß der japanische Staat sie den 'Ultra Low Emission Vehicles' zuordnet (siehe Tabelle 5-27) [Ford 1999, S. 261; Bosch 2002, S. 640].

Tabelle 5-26: Attributdaten von Elektrofahrzeugen [Eigene Berechnungen nach Bosch 2002, S. 640; Ford 1999, S. 261]

Preis (Yen)	Leistung (kW)	Verbrauch (kWh/100km)	Reichweite (km)	Infrastruktur (%)	Kosten pro kWh (Yen)	Kosten pro km (Yen)	CO ₂ (g/km)
3.300.000	49	26	161	0	16,67	4,33	0

Da der als Referenz zur Verfügung stehende Fahrzeugbestand von Toyota keine Erdgasfahrzeuge enthält, werden zur Bestimmung der Fahrzeugeigenschaften die Daten von Vergleichsfahrzeugen europäischer Automobilhersteller herangezogen. Bei den Fahrzeugen handelt es sich mit einer Ausnahme mit monovalentem Betrieb um bivalente CNG-Fahrzeuge.

Der Basispreis von Erdgasfahrzeugen liegt durchschnittlich um etwa 20 Prozent über dem vergleichbarer Benzinfahrzeuge. Damit kostet ein Fahrzeug mit Erdgasantrieb etwa drei Millionen Yen. Der japanische Staat ordnet CNG-Fahrzeuge wie Hybrid- und Elektrofahrzeuge den 'Ultra Low Emission Vehicles' zu. Mit einem durchschnittlichen Hubraum von 1872ccm werden sie bei der Automobilsteuer als 'medium vehicles' eingestuft. Die durchschnittliche Leistung der CNG-Fahrzeuge beträgt 76kW und als durchschnittliche Reichweite werden 300 Kilometer erreicht. Das Tankstellennetz befindet sich in Japan noch im Aufbau. Im Jahr 2001 gab es 180 CNG-Tankstellen bei insgesamt 52.592 Tankstellen für Benzin- und Dieselmotoren [Hayata o.J., S. 1]. Das entspricht einem Anteil von nur 0,34 Prozent. Der Kraftstoffverbrauch der Referenzfahrzeuge liegt im Durchschnitt bei 8,3 m³/100km und die CO₂-Emissionen sind mit 151 g/km noch relativ gering. Die Kosten für Erdgas betragen in Japan etwa 55 Yen pro Kubikmeter (Stand 9.06.2005). CNG wird lediglich mit der Umsatzsteuer von 5 Prozent belastet, so daß sich Kraftstoffkosten vor Steuern in Höhe von 52,38 Yen/m³ ergeben. Die Kosten für einen Kilometer belaufen sich somit auf 4,35 Yen (siehe Tabelle 5-28).

Tabelle 5-27: Attributdaten von Erdgasfahrzeugen (CNG) [Eigene Berechnungen]

Preis (Yen)	Leistung (kW)	Verbrauch (m ³ /100km)	Reichweite (km)	Infrastruktur (%)	Kosten pro m ³ (Yen)	Kosten pro km (Yen)	CO ₂ (g/km)
3.000.000	76	8,3	299	34	52,38	4,35	151

Im Vergleich zu Benzinfahrzeugen ergibt sich für Dieselfahrzeuge ein durchschnittlicher Aufpreis von rund 10 Prozent. Der Basispreis liegt somit bei 2.762.813 Yen. Die durchschnittliche Leistung von Dieselfahrzeugen liegt in Japan mit 84 kW etwa 6 Prozent unter der Leistung vergleichbarer Benzinfahrzeuge. Aufgrund des um circa 20 Prozent niedrigeren Verbrauchs (10,4l) im Vergleich zu Benzinfahrzeugen, emittieren Dieselfahrzeuge auch weniger CO₂ (241 gCO₂/km). Die Reichweite eines Diesel-PKW liegt mit 970 Kilometern deutlich über der Reichweite eines Fahrzeugs mit Ottomotor. Die Kraftstoffverfügbarkeit beträgt genau wie bei Benzinfahrzeugen 100 Prozent. Der Abgabepreis für einen Liter Diesel beträgt durchschnittlich 85 Yen pro Liter (Stand 9.06.2005). Abzüglich der 5 Prozent Mehrwertsteuer und einer Dieselsteuer (Diesel Handling Tax) in Höhe von 32,1 Yen/l ergeben sich Kraft-

stoffkosten vor Steuern von 48,85 Yen/l. Die Kosten pro gefahrenem Kilometer belaufen sich bei einem Verbrauch von 10,4l/100km auf 5,08 Yen/km (siehe Tabelle 5-29).

Tabelle 5-28: Attributdaten von Dieselfahrzeugen [Eigene Berechnungen]

Preis (Yen)	Leistung (kW)	Verbrauch (l/100km)	Reichweite (km)	Infrastruktur (%)	Kosten pro l (Yen)	Kosten pro km (Yen)	CO ₂ (g/km)
2.762.813	84	10,4	970	100	48,85	5,08	241

Zur besseren Übersicht vergleicht die folgende Tabelle 5-30 die Kraftstoffkosten der unterschiedlichen Antriebe. Mit den Daten zu Fahrzeugeigenschaften errechnet sich der Nutzen der einzelnen Fahrzeugtypen für den Konsumenten. Aus diesem Nutzen bestimmen sich die Marktanteile.

Tabelle 5-29: Übersicht der Kraftstoffkosten (gerundete Werte) [Eigene Berechnungen]

Fahrzeugtyp	Kraftstoffkosten ohne Steuern (JPY per l, kWh, m ³)	Mineralöl- und Mehrwertsteuer ¹⁶⁵ (JPY per l, kWh, m ³)	Kraftstoffkosten inkl. Steuern (JPY per l, kWh, m ³)	Kraftstoffkosten inkl. Steuern (JPY/km)
Gasoline 0	75	60	135	17,6
Electric	17	0,8	17,5	4,6
Hybrid	75	60	135	4,5
CNG	52	2,6	55	4,6
Diesel	49	36	85	8,8
Small*	75	60	135	8,6
Small**	75	60	135	7,8
Small***	75	60	135	7,6
Medium*	75	60	135	10,3
Medium**	75	60	135	10,5
Medium***	75	60	135	10,3
Large*	75	60	135	14,4
Large**	75	60	135	15,5
Large***	75	60	135	14,8

5.5.2.2 Dynamische Kaufpreisentwicklung

Der Referenzmodus von Toyota zeigt, daß der Kaufpreis über die Zeit nicht konstant bleibt, sondern vielmehr einer nichtlinearen Entwicklung unterliegt. Deshalb erfolgt – wie in Abschnitt 5.4.7.1 – im Modul ‚purchase price‘ eine nichtlineare Angleichung des Fahrzeugpreises an einen je nach Fahrzeugtyp unterschiedlich hohen Zielwert (maximum useful average base price). Bei den herkömmlichen Benzinfahrzeugen und den LEVs steigt der Kaufpreis im Zeitverlauf leicht an, während die Preise der Fahrzeuge mit alternativem Antrieb infolge der stetigen Marktdurchdringung leicht sinken.

Die Steuererminderungen des ‚green tax system‘ wirken sich wie Rabatte auf den Kaufpreis der Fahrzeuge aus, so daß die Implementierung über eine Minderung des Basispreises (base price) erfolgt. Zur Berechnung des Grundpreises werden die Kaufpreise der einzelnen Fahrzeugtypen aus dem Jahr 2001 als Anfangswerte (initial base price) für die Simulation herangezogen.

¹⁶⁵ Mineralölsteuer = Mineral Oil Tax (MOT); Mehrwertsteuer = Value Added Tax (VAT)

gen. Zur Berechnung der Steuerminderungen (rebate) werden die zwei Hilfsvariablen ‚rebate rate‘ und ‚auto tax‘ in das Japan-Modell eingefügt. Die Gaming-Variable ‚rebate rate‘ wird über die Einstellung der Rabattregler im Benutzerinterface gesteuert. Bei der Variablen ‚auto tax‘ werden die Automobilsteuern für die unterschiedlichen Fahrzeugtypen hinterlegt. Diese werden lediglich zur Berechnung der Höhe der Vergünstigungen verwendet und haben als Steuer keinen Einfluß auf den Kaufpreis. Sollen umweltschädlichere Antriebstechniken steuerlich benachteiligt werden, kann das über die ‚fees‘ erfolgen. Der Rabattbetrag eines Fahrzeugtyps wird durch die Multiplikation der ‚rebate rate‘ mit der Automobilsteuer berechnet. Der Faktor 2 summiert die Vergünstigungen für zwei Jahre:

$$(76.) \text{ rebate[vehicle types]} = \text{rebate rate[vehicle types]} * \text{auto tax[vehicle types]} * 1/100 * 2.$$

Die Fahrzeugtypen mit alternativer Antriebstechnologie wie Hybrid-, Elektro- und Erdgasfahrzeuge erhalten zusätzlich eine Reduzierung der ‚acquisition tax‘ um 2,2 Prozent beziehungsweise 2,7 Prozent (siehe Abschnitt 3.3.4.4). Damit ergibt sich beispielsweise für Hybridfahrzeuge die Gleichung:

$$(77.) \text{ rebate[Hybrid]} = \text{base price [Hybrid]} * 2.2/100 + \text{rebate rate[Hybrid]} * \text{auto tax[Hybrid]} * 1/100 * 2.$$

5.5.2.3 Kraftstoffkosten und Verbrauchsberechnung

Seit der letzten Anhebung der Mineralölsteuer im Jahr 1993 ist der Benzinpreis in Japan bis 1998 auf ein Niveau um etwa 98 Yen gesunken. Erst seit Mitte des Jahres 2004 ist der Kraftstoffpreis wieder bis auf derzeit 125 Yen angestiegen (Tabelle 5-31) [PAJ 2005, S. 22]. Die künftige Entwicklung der Kraftstoffpreise ist schwer vorherzusagen. Deshalb wird für die Simulationen ein konstanter Benzinpreis vor Steuern festgelegt.

Tabelle 5-30: Kraftstoffpreisentwicklung in Japan seit 1993 in Yen [PAJ 2005, S. 22]

1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
118,19	114,67	106,72	101,67	97,97	93,03	93,17	98,36	98,78	96,06	97,64	104	125

Bei der Betrachtung des Kraftstoffverbrauchs kann man seit 1997 eine Abnahme von 8 l/100km auf unter 7 l/100km bis zum Jahr 2002 beobachten (Tabelle 5-32). Dieser Trend wird sich durch technologische Weiterentwicklungen und strengere Kraftstoffeffizienzvorgaben zwar fortsetzen, aber aufgrund technischer Grenzen langsam abschwächen. Die Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs soll im Japan-Modell mit Hilfe einer Anpassungsschleife und einer nichtlinearen ‚Lookup‘-Funktion nachgebildet werden. Als Grundlage werden die gesetzlichen Kraftstoffeffizienzvorgaben für 2010 herangezogen, die eine Verbesserung der Effizienz um durchschnittlich 22,8 Prozent gegenüber dem Level von 1995 vorschreiben [JAMA 2004a, S. 43].

Tabelle 5-31: Kraftstoffverbrauchsentwicklung in Japan seit 1992 in l/ 100km [PAJ 2005, S. 22]

1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
8,0	8,1	8,0	8,0	8,1	7,9	7,6	7,4	7,2	7,0	6,7

Die Berechnung der gesamten Kraftstoffkosten erfolgt wie im deutschen Modell im Modul ‚Fuel Cost Calculation‘ mittels des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs der einzelnen Fahrzeugtypen (average fuel consumption). Die langfristige Reduzierung des durchschnittlichen Verbrauchs wird mit zwei Anpassungsschleifen modelliert, wobei die ‚Lookup‘-Funktion (function for effect of average fuel consumption on further development), in Abbildung 5-52 und 5.53 dargestellt, der Minderung der Reduzierungsgeschwindigkeit dient. Damit wird eine exponentiell verzögerte Abnahme der Kraftstoffverbrauchswerte erreicht.

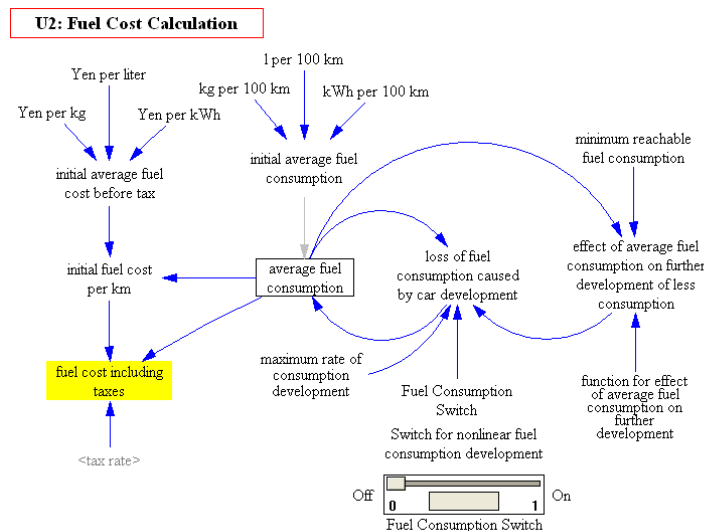


Abbildung 5-52: Modul zu Berechnung der Kraftstoffkosten

Die gesamten Kraftstoffkosten einschließlich Steuern (fuel cost including taxes) setzen sich aus den Kraftstoffkosten pro Kilometer (initial fuel cost per km), der Steuerrate (tax rate) und dem durchschnittlichen Verbrauch (average fuel consumption) zusammen. Dabei ergibt das Produkt aus Steuerrate und Verbrauch den tatsächlichen Steuerbetrag pro Kilometer.

$$(78.) \text{ fuel cost including tax [vehicle types]} = \text{initial cost per km[vehicle types]} + (\text{tax rate[vehicle types]} * \text{average fuel consumption[vehicle types]} * 0.01).$$

Die Kraftstoffkosten vor Steuern pro Kilometer (initial fuel cost per km) ergeben sich aus der folgenden Gleichung:

$$(79.) \text{ initial fuel cost per km[vehicle types]} = \text{initial average fuel cost before tax[vehicle types]} * \text{average fuel consumption[vehicle types]} * 0.01.$$

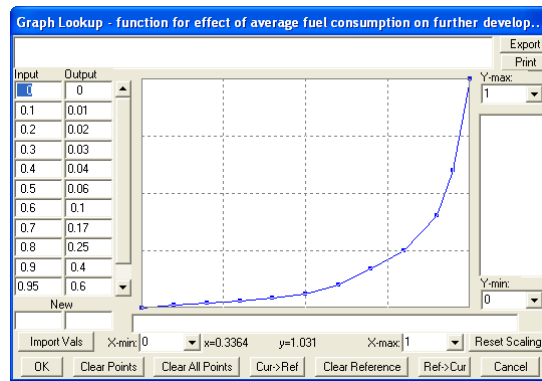


Abbildung 5-53: Lookup-Funktion zur nichtlinearen Kraftstoffkostenanpassung

5.5.2.4 Angleichung weiterer Attribute

Der Berechnungsvorgang für die hier aufgeführten Attribute erfolgt analog zur Berechnung der Kaufpreise und der Kraftstoffkostenberechnung. Infolgedessen soll auf die anderen Fahrzeugattribute nur kurz eingegangen werden.

Mit strengeren Emissionsgrenzwerten und einer Kraftstoffeffizienzsteigerung will die japanische Regierung in Zukunft eine weitere Minderung der lokal und überregional wirksamen Emissionen erreichen. Durch die Kraftstoffeffizienzvorgaben für das Jahr 2010 wird vor allem eine Minderung des CO₂-Ausstoßes erreicht. Für die Schadstoffe CO, NO_x und HC gelten seit 2005 strengere Emissionsstandards. Die Reduzierung der Emissionen wird sich jedoch im Zeitverlauf abschwächen. Die Verringerung der Emissionen wird durch eine s-förmige Anpassung an einen geschätzten Minimalwert simuliert.

Die Reichweite der Fahrzeuge ist abhängig vom Kraftstoffverbrauch. Eine Verbesserung der Kraftstoffeffizienz führt deshalb zu einer Reichweitenerhöhung. Bei den alternativen Antriebstechnologien besteht das Problem der Energiespeicherung mit der Folge geringerer Reichweiten. Technische Fortschritte in diesem Bereich und die Weiterentwicklung der Brennstoffzelle führen langfristig zu einer Angleichung der Reichweite an die der konventionellen Fahrzeuge.

Der Ausbau der Tankstelleninfrastruktur erhöht die Kraftstoffverfügbarkeit für Fahrzeuge mit alternativen Antriebstechnologien. Für die Kraftstoffverfügbarkeit wird deshalb im Zeitverlauf eine nichtlineare Angleichung vorgenommen.

Hinsichtlich der Motorleistungen haben lediglich die Elektrofahrzeuge einen Nachteil gegenüber den konventionellen Fahrzeugen. Mit der Weiterentwicklung der Brennstoffzelle erhofft man sich eine Steigerung der Motorleistung, so daß Elektrofahrzeuge beziehungsweise Brennstoffzellenfahrzeuge in Zukunft konkurrenzfähig sind.

5.5.3 Erweiterung und Anpassung der Emissionen

Genau wie im deutschen Modell sollen im japanischen Modell auch die vom japanischen Gesetzgeber beschränkten Emissionen (emission types) Kohlenmonoxid, Stickoxide und Fein-

staub sowie CO₂ untersucht werden (siehe Abschnitt 2.4.5). Zur Bestimmung der Schadstoffemissionswerte der einzelnen Fahrzeugtypen werden die Grenzwerte von 2000 (Tabelle 5-33) herangezogen, da alle neuzugelassenen Fahrzeuge des Referenzbestandes mindestens diese Grenzwerte erfüllen müssen. Die Werte für CO₂ leiten sich auch aus dem Referenzbestand ab:

Tabelle 5-32: Emissionsgrenzwerte von PKW in Japan [JAMA 2005a, S. 48; JAMA 2004a]

	Grenzwerte 10-15-mode (g/km)			
	CO		HC	NO _x
Grenzwerte 2000 für Benzin und LPG-Fahrzeuge (PKW)	0,67		0,08	0,08
LEV*	0,67		0,06	0,06
LEV**	0,67		0,04	0,04
LEV***	0,67		0,02	0,02
Dieselfahrzeuge (PKW)	CO	HC	NO _x	PM
Grenzwerte 2000	2,1	0,4	0,4	0,08

Die Angaben zu den Fahrzeugemissionen werden wie im deutschen Modell auf den höchsten Schadstoffwert normiert. Die Berechnung der Emissionen folgt aus der prozentualen Abweichung des Schadstoffausstoßes vom jeweiligen Referenzwert (standard emission in g per km). Diese Emissionsanteile (emission fraction) fließen in die Modellberechnungen ein. Tabelle 5-34 stellt die Referenzwerte und die Emissionsanteile der einzelnen Fahrzeugtypen dar¹⁶⁶:

Tabelle 5-33: Bestimmung der Emissionswerte in Prozent in Abhängigkeit vom Referenzwert [Eigene Berechnungen]

	CO	HC	NO _x	CO ₂	PM
Referenzwert	2,1	0,4	0,4	302	0,08
Gasoline 0	32	20	20	100	0
Electric	0	0	0	0	0
Hybrid	32	5	5	26	0
CNG	32	5	5	50	0
Diesel	100	100	100	80	100
Small*	32	15	15	49	0
Small**	32	10	10	44	0
Small***	32	5	5	44	0
Medium*	32	15	15	44	0
Medium**	32	10	10	60	0
Medium***	32	5	5	59	0
Large*	32	15	15	82	0
Large**	32	10	10	88	0
Large***	32	5	5	84	0

Das japanische Modell soll die Verbreitung umweltfreundlicher Fahrzeuge (LEV) mit Hilfe des Bonus-/Malusystems ‚green tax system‘ untersuchen. Die Einteilung der ‚Low Emission Vehicle‘ erfolgt anhand der im Jahr 2000 eingeführten Emissionsgrenzwerte. Die Nutzenberechnung hinsichtlich Umweltfreundlichkeit (U4) im Modul ‚market shares calculation‘ erfolgt ausschließlich anhand der NO_x-Emissionen, da diese – wie die HC-Emissionen – eine Kategorisierung in LEV-Klassen ermöglichen. Darüber hinaus mißt der japanische Gesetzge-

¹⁶⁶ Elektrofahrzeuge gelten unter den obengenannten Annahmen als ‚schadstofffrei‘.

ber Schadstoffen wie Stickoxiden wegen der hohen Luftverschmutzung in Japans Ballungszentren eine übergeordnete Bedeutung bei. Die Berechnung der Emissionen erfolgt dagegen für alle Emissionsarten.

5.5.4 Erweiterung des Modells um eine Fahrzeugalterungskette

Wie im deutschen Modell in Abschnitt 5.4.4 berücksichtigt das Japan-Modell die Veränderungen in der Altersstruktur des Fahrzeugbestandes, wobei sich die Alterungskette hier nach den in Japan gültigen Emissionsstandards und den vorhandenen Daten hinsichtlich der Löschungsraten (retirement rate) in drei Alterskohorten (1-5, 6-10 und 11-29 Jahre) unterteilt. Das japanische Modell berücksichtigt zudem keine Verschrottungsprämien. Im Japan-Modell wird die durchschnittliche Jahresfahrleistung (base travel) auf 10.000 Kilometer pro Fahrzeug festgelegt [VTT 2000a, S. 9] und mit Hilfe der ‚travel multiplier‘ altersspezifisch angepaßt (siehe Tabelle 5-35).

Tabelle 5-34: Altersanpassungsfaktoren für die Fahrleistung [Eigene Berechnungen nach BenDor 2004, S. 16f.]

Alterskohorte	1-5	6-10	11-29
TM	1,1	0,9	0,6

Zur Berechnung der altersabhängigen Emissionen („age emission factor“ = AEF) werden die Emissionsstandards von 2005, 2000 und die vor 2000 geltenden Grenzwerte herangezogen (siehe Tabelle 5-36). Die Emissionsstandards von 2000 dienen dabei als Referenzwerte (base emissions). Vereinfachend wird angenommen, daß Neufahrzeuge im Zeitraum der geltenden Emissionsstandards *mindestens* die vorgegebenen Grenzwerte erfüllen und die Emissionen für diesen Zeitraum konstant bleiben.

Tabelle 5-35: Emissionsstandards der betrachteten Zeiträume [JAMA 2004a, S. 44]

Fahrzeug-Typ	Emissionsgrenzwerte in g/km											
	vor 2000				2000				ab 2005			
	CO	HC	NO _x	PM	CO	HC	NO _x	PM	CO	HC	NO _x	PM
Gasoline*	2,1	0,250	0,250		0,67	0,08	0,08		1,15	0,050	0,050	
TLEV	2,1	0,188	0,188		0,67	0,06	0,06		1,15	0,025	0,025	
LEV	2,1	0,125	0,125		0,67	0,04	0,04		1,15	0,025	0,025	
ULEV	2,1	0,063	0,063		0,67	0,02	0,02		1,15	0,013	0,013	
Diesel	2,1	0,4	0,4	0,08	2,1	0,4	0,4	0,08	0,63	0,024	0,140	0,013

*Gasoline 0=keine Kategorisierung als ‚Low Emission Vehicle‘

Die Altersanpassungsfaktoren (AEF) errechnen sich – wie in Tabelle 5-37 – aus der prozentualen Abweichung gegenüber dem Referenzwert. Im Japan-Modell sind das die Grenzwerte des Jahres 2000.

Tabelle 5-36: Altersanpassungsfaktoren für die betrachteten Emissionen [Eigene Berechnungen]

Fahrzeug- Typ	Age Emission Factors (AEF)											
	11-29					6-10		1-5				
	CO	HC	NO _x	CO ₂	PM	Referenz- wert=1	CO ₂	CO	HC	NO _x	CO ₂	PM
Gasoline*	3,134	3,125	3,125	1,228			1,094	1,716	0,625	0,625	1	
TLEV	3,134	3,125	3,125	1,228			1	1,716	0,625	0,625	1	
LEV	3,134	3,125	3,125	1,228			1	1,716	0,625	0,625	0,95	
ULEV	3,134	3,125	3,125	1,228			1	1,716	0,625	0,625	0,95	
Diesel	1			1,149	1		1,075	0,3	0,06	0,35	1	0,16

*Gasoline 0=keine Kategorisierung als ‚Low Emission Vehicle‘

Wegen der Kopplung des CO₂-Ausstoßes an den Kraftstoffverbrauch werden die Altersanpassungsfaktoren für die CO₂-Emissionen mit Hilfe der Kraftstoffeffizienzvorgaben ermittelt. Zur Vereinfachung dienen die Zielvorgaben für das Jahr 2010 mit einer Verbesserung von 23 Prozent gegenüber dem Jahr 1995 hierbei als Referenzwert [JAMA 2004a, S. 43]. Die ‚Low Emission Vehicles‘ müssen diese Vorgaben bereits im Jahr 2000 erfüllen. Mit der Verschärfung des ‚green tax systems‘ im Jahr 2005 werden die Vorgaben für die Kategorien ‚LEV‘ und ‚ULEV‘ um weitere 5 Prozent angehoben. Die herkömmlichen Benzinfahrzeuge (Gasoline 0) müssen die Verbrauchsvorgaben bis zum Jahr 2010 erfüllen. Toyota beabsichtigt jedoch, die Zielvorgaben bereits im Jahr 2005 zu erreichen. Dieses Verbrauchsziel wird für die Berechnung der AEF für CO₂-Emissionen der ‚Gasoline 0‘-Fahrzeuge übernommen. Im Jahr 2000 lagen die Kraftstoffeffizienzwerte etwa 9 Prozent über den 2010-Zielvorgaben [JAMA 2004a, S. 43]. Dieselfahrzeuge müssen bis zum Jahr 2005 eine Verbesserung der Kraftstoffeffizienzwerte um 14,9 Prozent gegenüber dem Niveau von 1995 erreichen [JAMA 2002, S. 24]. Vereinfachend wird dabei von einer linearen Verbesserung ausgegangen, so daß die Verbrauchswerte bis zum Jahr 2000 um 7,45 Prozent verbessert wurden.

Die jährlich aus dem Fahrzeugbestand ausscheidenden Fahrzeuge werden mit einer natürlichen Löschungsrate (natural retirement rate) ermittelt, wobei die Stilllegungen mit dem Fahrzeugalter zunehmen. Für jede der drei Alterskohorten (1-5, 6-10 und 11-29 Jahre) wird in Tabelle 5-38 der Mittelwert der Löschungsraten ermittelt

Tabelle 5-37: Werte für die natürliche Löschungsrate [AIRA 2004]

Variable	Wert
natural retirement rate 1-5	0,0239
natural retirement rate 6-10	0,1752
natural retirement rate 11-29	0,8344

Die Einführung des ‚green tax system‘ mit den LEV-Kategorien erfolgt im Jahr 2001. Zur Vereinfachung wird der LEV-Referenzbestand von Toyota mit dem Beginn der Simulation auf Null gesetzt. Der Bestand an PKW-Dieselfahrzeugen ist aufgrund des niedrigen Marktanteils auch mit null festgesetzt.

Im Toyota-Referenzbestand sind (nur) die LEV-Fahrzeuge angegeben. Infolge fehlender Daten zur Bestimmung der in jeder Alterskohorte (1-5, 6-10 und 11-29 Jahre) befindlichen ‚gasoline 0‘-Fahrzeuge, wird der (aggregierte) japanische Gesamtfahrzeugbestand von 2004 herangezogen [JAMA o. J.; JAMA 2005b]. Diese Vorgehensweise begründet sich mit dem

hohen Toyota-Marktanteil von etwa 43 Prozent.¹⁶⁷ Tabelle 5-39 listet die im Japan-Modell festgelegten Anfangsbestände der einzelnen Kohorten auf (initial numbers of cars):

Tabelle 5-38: Anfangsbestand der Alterskohorten [Eigene Berechnungen nach AIRA 2004]

Alterskohorte	1-5	6-10	11-29
Gasoline 0	7.352.626	7.261.325	3.852.318

Die Entwicklung des japanischen Fahrzeugbestandes zeigt seit 1970 ein kontinuierliches Wachstum. Das durchschnittliche Fahrzeugalter beträgt 9,96 Jahre (Stand 2000) [JAMA 2005, S: 13, 42; JAMA o. J.].

5.5.5 Bestimmung der jährlichen Neuzulassungen

Die (geschätzten) Absatzzahlen von Toyota in Japan weisen im Zeitraum von 2004 bis 2008 einen leichten Rückgang der Neuzulassungen um jährlich etwa 1 Prozent auf [JAMA 2002, S. 24; Automotive News Europe 2004]. Zur Modellierung der Neuzulassungen werden für die Jahre 2001 bis 2003 die Toyota-Referenzdaten herangezogen. Der Zeitraum von 2004 bis 2008 berücksichtigt den von der ‚Automotive News Europe‘ prognostizierten Trend. Ab dem Jahr 2009 stagnieren die Zulassungszahlen. Mit Ausnahme des nicht berücksichtigten Produktionsschlusses für Dieselfahrzeuge ohne Partikelfilter entspricht das Modul ‚total sales calculation‘ dem gleichnamigen Modul im deutschen Modell (siehe Abschnitt 5.4.5).

Die Neuzulassungen des Referenzbestandes in 2001 (initial sales) betragen 1.443.504 Fahrzeuge. Die Wachstumsfunktion erhält als Input die Laufzeit der Simulation in Jahren (z.B. $t - t_0 = 2010 - 2001 = 9$) und liefert als Output eine Wachstumsrate, die sich wie im deutschen Modell über eine Lookup-Variable (growth fraction) bestimmt. Die Lookup-Variable für die Modellierung der Referenzdaten ist in Abbildung 5-54 dargestellt.

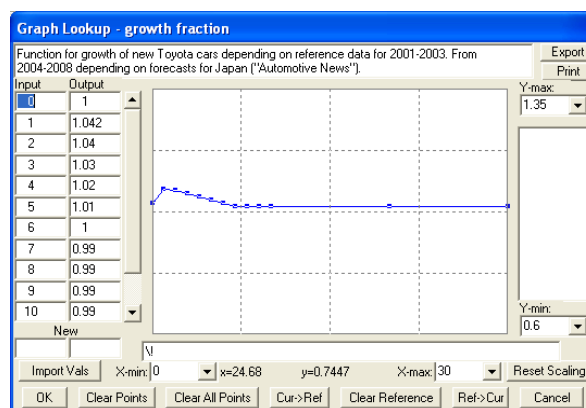


Abbildung 5-54: Lookup-Variable zur Bestimmung der jährlichen Neuzulassungen

Die Gesamtzahl der Neuzulassungen wird nun genau wie im Modell Deutschland mit Hilfe der realen Marktanteilsberechnungen für Neuverkäufe auf die einzelnen Fahrzeugtypen aufgeteilt und der Marktdurchdringungsprozeß mit Hilfe einer Verzögerungsfunktion mit definier-

¹⁶⁷ Toyota 03/2004: 18,5 Mio. Fahrzeuge in Japan

barem Profil abgebildet. Wie in Abschnitt 5.4.5 erläutert, ergibt die logistische Funktion das s-förmige Verhalten von Marktdurchdringungsprozessen [Sterman 2000, S.253ff.]. Neben Kaufentscheidungen von Konsumenten oder Lieferengpässen wirken auch Inzentivierungen zum Teil langfristig. Beim japanischen Bonus-/ Malussystem ist der Grund dafür der niedrige Bekanntheitsgrad des Steueranreizsystems in der Bevölkerung. Lediglich 58 Prozent der Fahrzeugkäufer hatten nach einer Marktstudie von 2003 Kenntnis von den Steuerminderungen. Davon kannten nur 9 Prozent der Befragten die Details, während 49 Prozent lediglich die Bezeichnung des vom Staat initiierten Programms kannten [JAMA 2004b, S. 1]. Eine Verzögerungszeit von zwei Jahren hat sich für das Japan-Modell als sinnvoll herausgestellt.

5.5.6 Käuferpräferenzen in Japan

Die Koeffizienten der Nutzenfunktionen werden analog zum deutschen Modell umgerechnet, um das Modellverhalten der exogen vorgegebenen Werte durch die Umstellung auf SI-Einheiten nicht zu beeinflussen (siehe Abschnitt 5.4.5). Die Änderung der Koeffizienten gewährleistet genau wie in Abschnitt 5.4.5 das gleiche Modellverhalten wie vor der Umstellung der Einheiten. Dazu wird der Kehrwert der eingeführten SI-Einheiten verwendet (siehe Tabelle 5-39). Die Emissionsanteile und die Kraftstoffverfügbarkeit haben keine Einheit.

Tabelle 5-39: Umrechnung der Koeffizienten der Nutzenfunktionen [Eigene Berechnungen nach Ford 1999, S. 266, FUB 2005; Börse 2005; Bosch 2002, S. 21ff.]

Fahrzeugattribute	Nr.	Neue Koeffizienten
purchase price (1000\$)	1	-0,00127
fuel cost (cents/ mile)	2	-0,0025
range (100 miles)	3a	1,279
range ² (100 miles) ²	3b	-0,117
emission level (fraction of current)	4a	-3,080
emission level ² (fraction of current) ²	4b	1,530
fuel availability (fraction of stations)	5a	2,240
fuel availability ² (fraction of stations) ²	5b	-0,956
horsepower (PS)	6	0,01083

In diesem Abschnitt sollen die Präferenzen der Konsumenten hinsichtlich der Fahrzeugattribute an den japanischen Automobilmarkt angepaßt werden. Für die kalifornischen Autokäufer ist der ‚Fahrzeugpreis‘ das wichtigste Kaufkriterium, gefolgt von der ‚Reichweite‘ (Tabelle 5-7). Die ‚Umweltfreundlichkeit‘, die ‚Kraftstoffkosten‘, die ‚Kraftstoffverfügbarkeit‘ sowie die ‚Motorleistung‘ haben keinen so großen Einfluß auf die Kaufentscheidung. In Kalifornien spielt die ‚Reichweite‘ aufgrund der großen Entfernungen zwischen den Städten eine übergeordnete Rolle. Dagegen lebt in Japan die Bevölkerungsmehrheit in Metropolen (siehe Abschnitt 2-2-4-2). Dadurch ist die ‚Reichweite‘ in Japan nicht so kaufentscheidend wie in Kalifornien [Kitamura 2004].

Im Japan-Modell soll der ‚Kaufpreis‘ analog zum Ford-Modell das wichtigste Kaufkriterium darstellen. Aufgrund der teilweise hohen Luftverschmutzungen in den japanischen Großstädten hat die Umweltfreundlichkeit eines Fahrzeugs eine größere Bedeutung als beispielsweise

in Deutschland. Die verschiedenen Sterne-Kategorien (siehe Abschnitt 3.3.4.4) vermitteln die Umweltfreundlichkeit nach außen und erzeugen damit ein positives Image des Fahrzeuges. Aus diesen Gründen wird das Fahrzeugattribut ‚emission fraction‘ auf Rang zwei gesetzt. Die ‚Motorleistung‘ wird im Japan-Modell auf Rang drei eingestuft, gefolgt von der ‚Kraftstoffverfügbarkeit‘. Damit soll eine realistische Bewertung der Elektro- und Erdgasfahrzeuge erreicht werden, die in diesen Bereichen ihre größten Nachteile haben. Diese Einschätzung wird durch die minimalen Absatzzahlen für diese beiden Fahrzeugtypen durch die Referenzdaten gestützt. Die ‚Reichweite‘ spielt in Japan, wie oben beschrieben, eine geringere Rolle als in Kalifornien und steht auf Rang fünf. Die ‚Kraftstoffkosten‘ sind in Japan nicht so hoch wie in Deutschland. Zudem sind die jährlichen Fahrleistungen deutlich geringer und deshalb nicht so kaufentscheidend (siehe Tabelle 5-40).

Tabelle 5-40: Rangfolgeberechnung der Attribute

	Käuferpräferenz (USA)	Rangfolge (USA)	Rangfolge Japan
Kaufpreis	3,00	1	1
Reichweite	2,79	2	5
Umweltfreundlichkeit	1,00	3	2
Kraftstoffkosten	0,92	4	6
Kraftstoffverfügbarkeit	0,87	5	4
Motorleistung	0,83	6	3

5.5.7 Handlungsalternativen und Entscheidungsvariablen im Modell

Der folgende Abschnitt berücksichtigt die unter Kapitel drei erläuterten politischen Lenkungsinstrumente im japanischen Modell. Dabei wird zwischen Bonuszahlungen auf den Fahrzeugpreis und Verbrauchssteuern unterschieden.

5.5.7.1 Bonuszahlungen auf den Kaufpreis – ‚Green Tax Systems‘

Im April 2004 führt die japanische Regierung das verschärfte ‚green tax system‘ ein, um damit die Ausgaben für die Bonuszahlungen zu reduzieren. Der japanische Gesetzgeber begründet die Verschärfung zudem damit, daß das Ziel einer Verbreitung umweltfreundlicher Fahrzeuge erreicht sei. Das Steueranreizsystem von 2004 fördert nur noch die beiden neuen Kategorien der 3- und 4-Sterne Fahrzeuge sowie alternative Antriebe (siehe Tabelle 3-6 in Abschnitt 3.3.4.4). Zu diesen neuen Fahrzeugtypen liegen zum Zeitpunkt der Untersuchung in 2005 keine Referenzdaten vor. Aus dem Referenzbestand von Toyota läßt sich aber erkennen, daß viele der 2- und 3-Sterne Fahrzeuge des ‚green tax systems‘ von 2001 die Anforderungen der neuen 3- und 4-Sterne LEVs erfüllen.

Die Verschärfung des Steueranreizsystems untersucht den ‚konstanten‘ Fall, damit mögliche andere Einflußfaktoren ausgeschlossen werden können. Ab 2004 erhält der Fahrzeughalter nur noch ein Jahr Ermäßigung auf die Automobilsteuer. Dafür reduziert sich auch für die LEVs die Anschaffungssteuer, welche je nach Fahrzeugtyp 10.000 Yen beziehungsweise 15.000 Yen (siehe Tabelle 3-4) beträgt. Um mögliche Auswirkungen deutlich erkennbar zu

machen, werden ab 2006 die Ermäßigungen für Low Emission Vehicles komplett aufgehoben, so daß nur noch die alternativen Antriebstechnologien gefördert werden.

5.5.7.2 Kraftstoffbesteuerung durch Verbrauchssteuern (Ökosteuer)

Neben der Verschärfung des ‚Green Tax System‘ untersucht das Modell die Wirkung von Ökosteuern auf die Neuzulassungen, den Fahrzeugbestand und die Emissionen für den konstanten Fall. Der Gesetzgeber in Japan erwägt eine Verbrauchssteuer insbesondere im Hinblick auf die Erfüllung der Kyoto-Vorgaben zur Senkung der CO₂-Emissionen. Das Umweltministerium diskutiert die Einführung für das Jahr 2007 (siehe Abschnitt 3.3.4.2). Um eine mögliche Wirkung deutlich darstellen zu können, wird in einem Extremszenario eine Ökosteuer von 100 Yen pro Liter (plus Mehrwertsteuer von 5 Prozent) erhoben. Dieses Szenario erfolgt ohne die Verschärfung des ‚green tax systems‘ und im konstanten Fall, um mögliche andere Einflußfaktoren auszuschließen. Das Szenario wird als ‚Statisches Szenario ‚GTS mit Ökosteuer‘ bezeichnet.

Die Steuerrate für Benzinkraftstoff erhöht sich von rund 60 Yen/l auf 165 Yen/l. Für Dieselfahrzeuge steigt das Steueraufkommen von rund 36 Yen/l auf 141 Yen/l. Die Steuern für Erdgas und Strom bleiben im Zeitverlauf konstant. Aus dem Steueranteil pro Liter und dem Kraftstoffverbrauch ergeben sich die Kraftstoffkosten pro Kilometer inklusive Steuern. Diese sind nach der Einführung der Ökosteuer deutlich angestiegen.

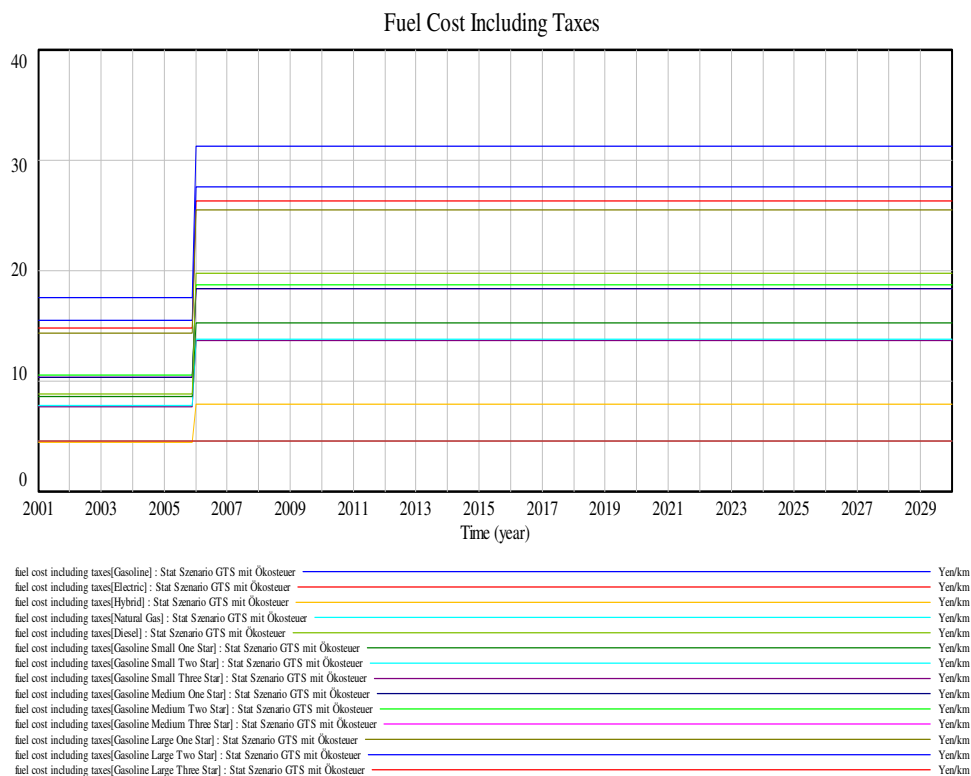


Abbildung 5-55: Statisches Szenario GTS mit Ökosteuer: Kraftstoffkosten pro Kilometer

5.5.7.3 Kombination der umweltpolitischen Instrumente

In dem folgenden Szenario wird eine Verschärfung des ‚green tax system‘ mit der Einführung der Ökosteuer kombiniert. Zudem soll die nichtlineare Angleichung der Fahrzeugattribute berücksichtigt werden. Die Ökosteuer wird im Gegensatz zu den vorherigen Szenarien deutlich moderater eingesetzt und über mehrere Jahre langsam erhöht. Die Verschärfung des Steueranreizsystems fällt dagegen deutlicher als im oben beschriebenen Szenario aus, so daß stufenweise die Ermäßigungen für die Low Emission Vehicles abgeschafft werden und damit nur noch die alternativen Antriebstechnologien gefördert werden. Mit diesem Szenario sollen sowohl die Ausgaben der Bonuszahlungen als auch die Emissionen reduziert werden.

Die Verschärfung der Steuerermäßigungen beginnt ab dem Jahr 2004 mit der Aufhebung der Förderung von ‚1-Sterne-Low Emission Vehicles‘. Zwei Jahre später werden auch die Vergünstigungen für die 2- und 3-Sterne Fahrzeuge aufgehoben. Ab 2006 werden dann nur noch Fahrzeuge mit alternativem Antrieb steuerlich begünstigt. Die Förderung der alternativen Antriebstechnologien läuft schließlich im Jahr 2015 aus. Im Jahr 2006 wird die erste Stufe der Ökosteuer in der Höhe von 10 Yen pro Liter Benzin- und Dieselmotorkraftstoff eingeführt. Bis einschließlich 2010 wird die Ökosteuer schrittweise jährlich um 10 Yen pro Liter erhöht. Auf Erdgas und Strom wird über den gesamten Zeitverlauf keine Ökosteuer erhoben.

5.5.8 Zusammenfassung

Das Simulationsmodell wurde an den japanischen Automobilmarkt angepaßt. Die implementierte Alterungskette erhöht die Prognosegenauigkeit bezüglich der Zusammensetzung des Fahrzeugbestandes. Zudem wurde ein weiteres Fahrzeugattribut (Owning Cost) in das Modell integriert. Mit diesem Attribut wird die Sensibilität der potentiellen Fahrzeugkäufer bezüglich der mit der Fahrzeuggröße zusammenhängenden, jährlich zu entrichtenden, Fahrzeugsteuer simuliert. Die ursprüngliche Betrachtung von nur einer Emissionsart (HC) wurde um weitere automobilbedingte Luftschadstoffe (CO, NO_x, PM) sowie das Treibhausgas CO₂ erweitert. Die Fahrzeugtypen wurden um LEV-Kategorien ergänzt sowie Methanolfahrzeuge durch Diesel-PKW ersetzt. Alle Fahrzeugeigenschaften und Einheiten sind an die japanischen Rahmenbedingungen angepaßt worden. Zusätzlich wurden japanische Emissionsstandards und Kraftstoffsteuern berücksichtigt. Die Fahrzeugattribute können mit einer nichtlinearen Angleichung im Zeitverlauf angepaßt werden. Damit werden technologische Weiterentwicklungen mit einbezogen. Diese Funktion kann über eine ‚Gaming‘-Variable ein- oder ausgeschaltet werden. Die Modellierung des Fahrzeugbestandes berücksichtigt die Neuzulassungen sowie die altersbedingten Fahrzeuglöschungen. Der Marktdurchdringungsprozeß wurde für das Japan-Modell mit zwei Jahren festgelegt. Abschließend sind die Koeffizienten der Fahrzeugattribute an den japanischen Automobilmarkt angepaßt worden, um damit die Rangfolge der Attribute zu verändern. Mit diesem an den japanischen Automobilmarkt angepaßten Simulationsmodell kann die Analyse der Wirkung des Steueranreizsystems auf die Zielgrößen anhand von Szenarioentwicklungen durchgeführt werden.

6 Fallstudie

Mit Hilfe der im vorherigen Kapitel entwickelten Simulationsmodelle sind nun – beispielhaft für die wichtigen Automobilmärkte Deutschland und Japan – die Verifikation¹⁶⁴ der Modelle sowie eine Wirkungsabschätzung zwischen Umweltbelastungen, alternativen Antriebs- und Kraftstoffstrategien und den zur Umsetzung der Strategien anwendbaren umweltpolitischen Instrumentarien vorzunehmen. Dies erlaubt schließlich die Bewertung verschiedener Politik- und Gestaltungsoptionen im Individualverkehr.

Abschnitt 6.1 stellt Szenarien im deutschen Modell dar, wobei zwischen Szenarien mit Variation der Rahmenbedingungen (Abschnitt 6.2) und mit Einsatz ökonomischer Instrumente (Abschnitt 6.3) unterschieden wird. Auf Grundlage von zwei Szenarien für Japan in Abschnitt 6.4 untersucht 6.5 die Wirkung umweltpolitischer Instrumente. Abschnitt 6.6 gibt Handlungsempfehlungen an Politik und Wirtschaft.

6.1 Übersicht der Szenarien und Ziele im Modell Deutschland

Durch Beeinflussung der Marktdurchdringung alternativer Antriebe und Kraftstoffe sollen die angestrebten Umweltziele erreicht werden. Die Wirksamkeit der Kraftstoffstrategien ist dabei abhängig von der Intensität der Antriebsstrategieeinführung, da die Emissionsvorteile durch alternative Kraftstoffstrategien für jede Antriebsstrategie unterschiedlich ausfallen.

Als Emissionsminderungsziel steht besonders die Reduktion des Treibhausgases CO₂ im Mittelpunkt des Interesses. Veröffentlichtes Ziel sind die Reduktion auf 140 Gramm CO₂ pro Kilometer bei Neufahrzeugen bis zum Jahr 2008 und auf 120 Gramm pro Kilometer bis zum Jahr 2012 (siehe Abschnitt 2.4.4) [SRU 2005, S.170]. Auch die Reduktion von Partikel- und NO_x-Emissionen sind erklärtes Ziel der Politik, da in vielen deutschen Städten ansonsten die erlaubten Grenzwerte dieser Emissionen auch in Zukunft überschritten werden (siehe Abschnitt 2.2.4.1) [SRU 2005, S.150]. Das fiskalische Ziel, den Staatshaushalt nicht neuen Belastungen auszusetzen, wird durch die geforderte Aufkommensneutralität angestrebt. Eine Umschichtung der Finanzierung zwischen den einzelnen Instrumenten ist dabei möglich.

Abschnitt 6.1 stellt in einem Überblick elf verschiedene Szenarien für den Individualverkehr in Deutschland vor, wobei zwischen zwei grundsätzlichen Variationen unterschieden werden kann. Die erste Gruppe der Szenarien (1-6) untersucht die Einflüsse von Veränderungen der exogenen Rahmenbedingungen auf die Emissionsentwicklung im Individualverkehr. Diese Veränderungen werden teilweise durch den Einsatz ordnungspolitischer Instrumente herbei-

¹⁶⁴ Verifikation ist die Überprüfung einer logisch-analytischen oder empirischen Aussage auf ihre Richtigkeit, wohingegen Validierung die Gültigkeit der Realitätsnähe des logischen Modells ausdrückt [Sterman 2000; Law und Kelton 2000, Liebl 1995].

geführt oder verstärkt und lassen sich auf den technischen Fortschritt, den Einsatz alternativer Kraftstoffstrategien sowie die sich daraus ergebenden veränderten ökonomischen Rahmenbedingungen zurückführen.

Die zweite Gruppe der Szenarien (7-11) untersucht den Einfluß von ökonomischen Instrumenten der Umweltpolitik auf die Emissionsentwicklung. Dies geschieht über Beeinflussung des Anteils der alternativen Antriebsstrategien am gesamten Fahrzeugbestand durch unterschiedliche Fördermaßnahmen und -intensitäten.

Weiter wird hierzu zwischen vier verschiedenen Simulationsmodellen gewählt. Diese sind das ‚Basic‘-Modell und das ‚Advanced‘-Modell des ‚Management Flight Simulator‘ (siehe Abschnitt 5.3.1) sowie das automatisierte Politikmodelle ‚Requal‘ mit homogen verteilten Bonus- und Maluszahlungen und einer festen Gesamtsumme der Fördermittel (siehe Abschnitt 5.4.12.2 und 5.4.12.3) und das automatisierte Politikmodell ‚Ropt‘ mit dynamisch angepassten Bonuszahlungen, die auf eine optimale Lenkungswirkung hin ausgerichtet sind (Abschnitt 5.4.12.3). Tabelle 6-1 zeigt eine Übersicht der Veränderungen in den Szenarien.

Tabelle 6-1: Übersichtstabelle der untersuchten Szenarien im deutschen Modell

Scenario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Model	Basic	Basic	Basic	Basic	Basic	Basic	Adv.	Adv.	Requ A	Requ A	Ropt A
U1: price development	off	on	on	on	on	on	on	on	on	on	on
U2: fuel consumption d.	off	on	on	0 - 1	on	on	on	on	on	on	on
U3: range development	off	on	on	on	on	on	on	on	on	on	on
U4: emission fraction d.	off	on	on	0 - 1	on	on	on	on	on	on	on
U5: fuel availability d.	off	on (1)	0 - 1,5	on	on	on	on	on	on	on	on
U6: horsepower d.	off	on	on	on	on	on	on	on	on	on	on
time f. fuelprice doubling	20	20	20	20	20	20	12	20	20	20	20
travel distance variation	0	0	0	0	-100	0	0	0	0	0	0
CO2-Vehicle tax	off	off	off	off	off	off	on	off	on	on	on
with adjustment	no	no	no	no	no	no	yes	no	yes	yes	yes
year for P.F.-Diesels	2040	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2008
extra Fee PMx-Filter	no	no	no	no	no	no	no	vari	300	300	300
Scrapage payment	no	no	no	no	no	no	no	no	no	700	no
max ET for Balance	0 Mrd.	0 Mrd.	0 Mrd.	0 Mrd.	0 Mrd.	0 Mrd.	0 Mrd.	0 Mrd.	2,1 Mrd.	2,1 Mrd.	vari
Total Feebate Value	x	x	x	x	x	x	x	x	7 Mrd.	7 Mrd.	vari
Ratio ET for Balance	x	x	x	x	x	x	x	x	0.3	0.3	0.3

Das Ziel des Einsatzes von umweltpolitischen Instrumenten ist das Erreichen bestimmter Emissionsminderungen, ohne dafür hohe zusätzliche Belastungen des Staatshaushaltes aufwenden zu müssen. Darüber hinaus soll die Mobilität der Bürger nicht eingeschränkt werden. Letzteres wird in den Simulationsmodellen dadurch erreicht, daß der Instrumenteneinsatz keinen Einfluß auf die Entwicklung des Gesamtfahrzeugbestandes haben soll, das heißt (nur) die Entwicklung der Marktverteilung von Antrieben und Kraftstoffen ist von Interesse. Auf diese Weise lassen sich die Emissionsreduktionen und Haushaltsentwicklungen bei gleichbleibender Mobilität vergleichen. Das Mittel zum Erreichen von Umweltzielen sind die voneinander abweichenden Instrumentenkombinationen bei den Antriebs- und Kraftstoffstrategien.

Die folgenden Abschnitt 6.2 und 6.3 erläutern die obengenannten Szenarien für Deutschland ‚mit Variation der Rahmenbedingungen‘ und ‚mit Einsatz ökonomischer Instrumente‘.

6.2 Szenarien mit Variation der Rahmenbedingungen

Die erste Gruppe von Szenarien untersucht die Auswirkungen von Veränderungen der exogenen Rahmenbedingungen auf die angestrebten Ziele. Es werden keine ökonomischen umweltpolitischen Instrumente eingesetzt, so daß Rückschlüsse auf die Erreichbarkeit der angestrebten Ziele durch diese exogenen Änderungen möglich werden.

6.2.1 Szenario 1: Ausgangsszenario ohne äußere Einflüsse

Im Szenario 1 treten keine Fortschritte oder Veränderungen durch die Fahrzeug- und Kraftstoffentwicklung auf. Der Wareneinstandspreis für die Kraftstoffe bleibt konstant, ebenso wie die Kaufpreise, Leistungs-, Reichweiten- und Verbrauchswerte der Fahrzeugtypen. Die jährliche Durchschnittsfahrleistung bleibt ebenfalls konstant. Das Eintreffen dieses Szenarios in der Realität ist sehr unwahrscheinlich; vielmehr dient es als Referenz für Vergleiche mit anderen Szenarien.

Nach den getroffenen Annahmen fallen im Haushalt weder Einnahmen noch Ausgaben an, daher steigt der Ausgangsbetrag des Haushaltes nur durch die Verzinsung des Guthabens an. Dieses Verhalten ist bei allen Szenarien dieser Gruppe zu erwarten, in denen nur die exogenen Rahmenbedingungen verändert werden.

Wie in Abbildung 6.1 ersichtlich reduziert sich beim Fahrzeugbestand der Anteil der Ottomotorfahrzeuge deutlich auf 7,3 Millionen Fahrzeuge und wird hauptsächlich durch Dieselfahrzeuge ersetzt, die nun einen Bestand von 31,7 Millionen Fahrzeugen aufweisen. Davon besitzt die Mehrzahl von 17,12 Millionen Fahrzeugen keinen Partikelfilter.

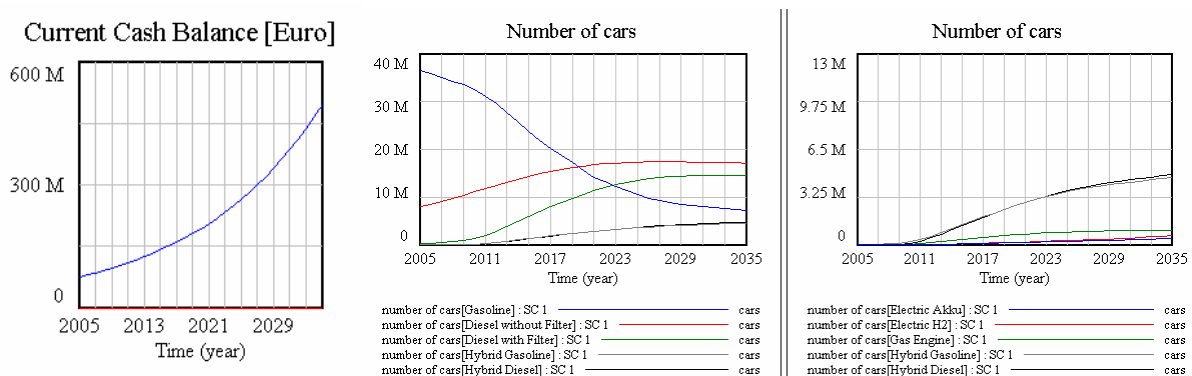


Abbildung 6-1: Haushalt- und Fahrzeugbestandsentwicklung ohne äußere Einflüsse

Die Zahl der Hybridfahrzeuge steigt langsam auf 9,4 Millionen Fahrzeuge im Jahr 2035 an und ist nahezu gleichmäßig zwischen Diesel- und Ottomotorhybridantrieben aufgeteilt. Alle anderen Fahrzeugtypen nehmen eine Nischenstellung ein.

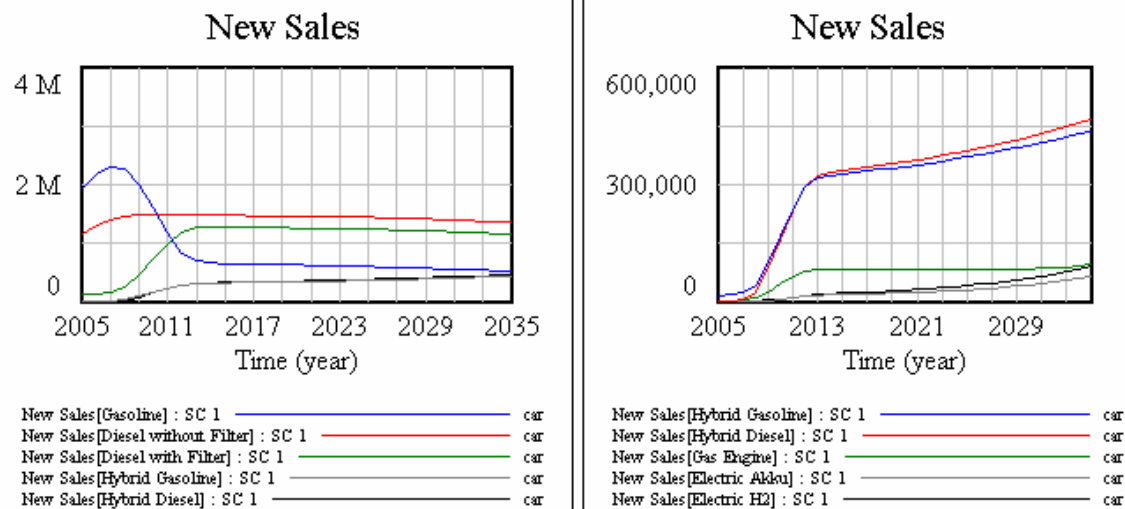


Abbildung 6-2: Entwicklung der Neuverkäufe ohne äußere Einflüsse

Die Neuverkäufe von Ottomotorfahrzeugen steigen noch kurz an (siehe Abbildung 6-2), bis diese im Jahr 2015 ein stabiles, leicht abfallendes Niveau erreichen. Im gleichen Jahr stabilisieren sich auch die Verkaufszahlen der anderen Fahrzeugtypen auf ihrem jeweiligen Niveau, wobei die konventionellen Antriebe eine leicht fallende Tendenz und die alternativen Antriebsstrategien eine leicht steigende Tendenz aufweisen.

Die Emissionswerte für CO₂ und CO bleiben stabil, während sich die Emissionen von HC, NO_x und PM_x (Partikel) verdoppeln (siehe Abbildung 6-3). Der Zeitraum des besonders starken Anstieges dieser Emissionen fällt mit der Zunahme der Dieselfahrzeuge zusammen, so daß hier ein eindeutiger Zusammenhang erkennbar ist. Die Emissionsziele werden deutlich verfehlt, denn es ist keine nennenswerte Emissionssenkung eingetreten.

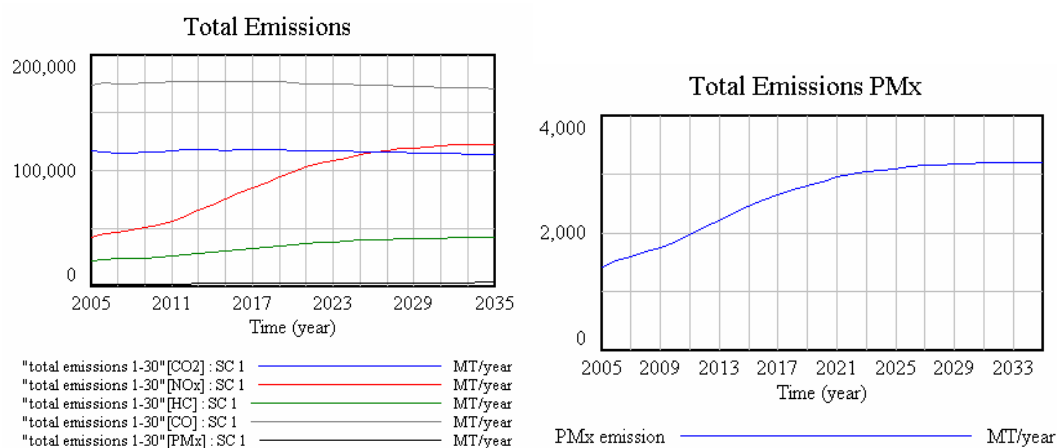


Abbildung 6-3: Emissionsentwicklung ohne äußere Einflüsse

6.2.2 Szenario 2: Technischer Fortschritt

Im zweiten Szenario werden alle technischen und dadurch bedingten ökonomischen Entwicklungen in die Simulation mit einbezogen. Auch die Umsetzung der Kraftstoffentwicklung tritt entsprechend der heutigen Prognosen ein. Dieselfahrzeuge werden ab dem Jahr 2008 aus-

schließlich mit serienmäßigem Partikelfilter ausgeliefert. Alle anderen Parameter bleiben unverändert.

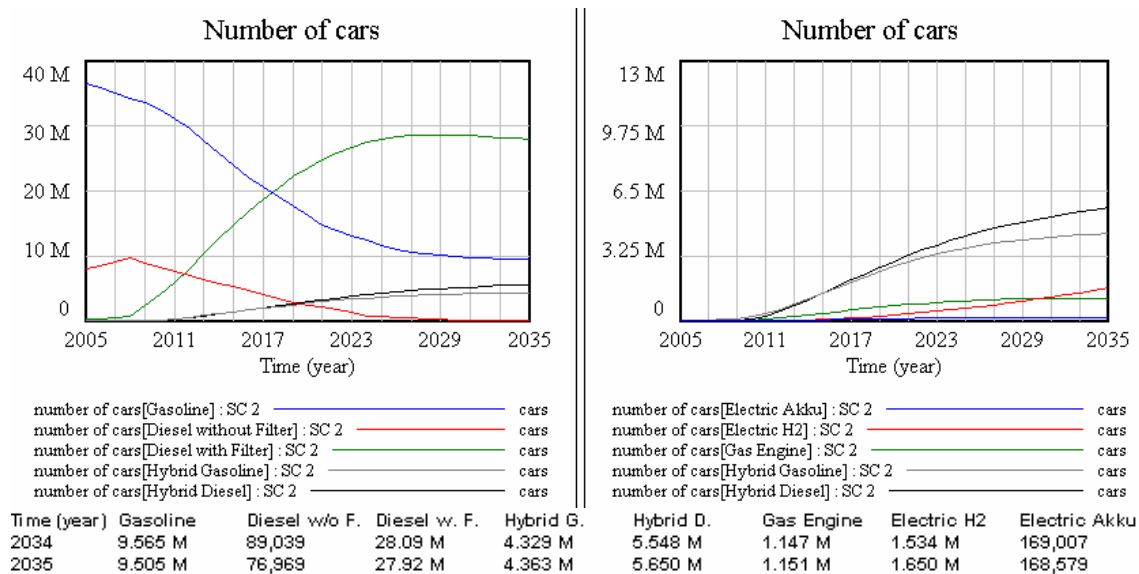


Abbildung 6-4: Fahrzeugbestandsentwicklung bei technischen Fortschritt

Wie in Abbildung 6-4 deutlich wird, sinkt die Anzahl der Fahrzeuge mit Ottomotor – auf etwas höherem Niveau – mit einem ähnlichen Verlauf wie in Szenario 1, so daß 9,5 Millionen Fahrzeuge im Jahr 2035 vorhanden sind. Die Anzahl der Dieselfahrzeuge beträgt mit 28 Millionen Fahrzeugen deutlich weniger als in Szenario 1, wobei durch die serienmäßige Ausstattung der Dieselfahrzeuge mit Partikelfilter seit 2008 der Anteil an Dieselfahrzeugen ohne Filter kontinuierlich fällt und diese in der Mitte der 2020er Jahre kaum noch relevant sind. Entsprechend stark ist der Anstieg der Dieselfahrzeuge mit Filter, da diese die anderen Dieselfahrzeuge ersetzen. Die (noch) verbleibende Differenz von 1,5 Millionen Fahrzeugen zwischen Dieselfahrzeugen mit und ohne Filter wird durch eine verstärkte Verbreitung der alternativen Antriebstrategien ausgeglichen. 600.000 zusätzliche Hybridfahrzeuge, davon vor allem mehr Kombinationen auf Diesel- und Elektroantrieb, 150.000 zusätzliche Erdgasfahrzeuge und 1 Million zusätzliche Brennstoffzellenfahrzeuge ersetzen die im Bestand fehlenden konventionellen Fahrzeuge. Starke Einbußen sind beim Bestand der Elektrofahrzeuge mit Akkumulator zu beobachten, der von 456.000 Fahrzeugen in Szenario 1 auf 168.500 Fahrzeuge in diesem Szenario abfällt.

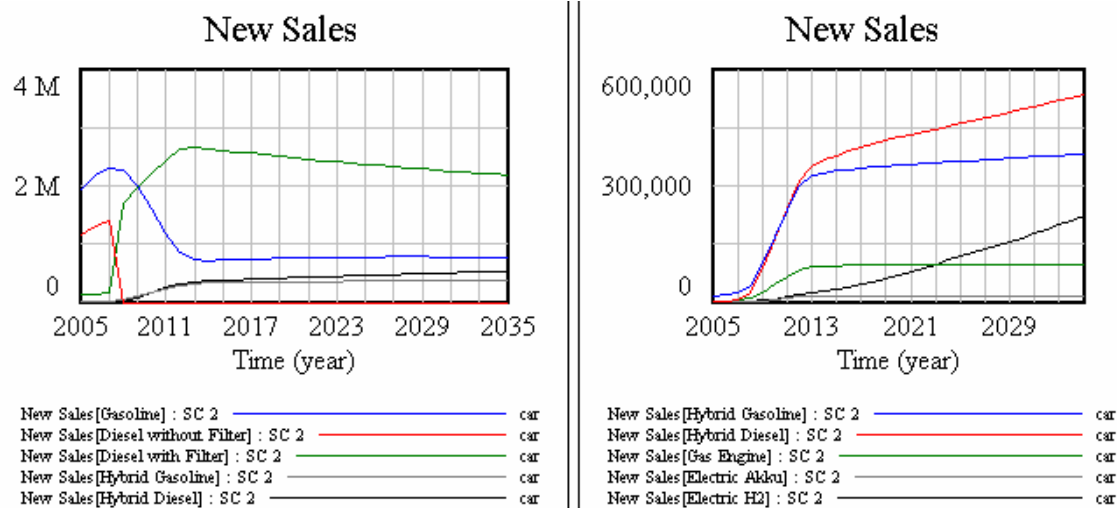


Abbildung 6-5: Entwicklung der Neuverkäufe bei technischem Fortschritt

Bei der Anzahl an Neuverkäufen macht sich die serienmäßige Ausstattung mit Partikelfilter besonders deutlich bemerkbar, da ab 2009 die neuverkauften Dieselfahrzeuge ohne Filter durch Fahrzeuge mit Filter substituiert werden (siehe Abbildung 6-5). Bei den alternativen Antriebsentwicklungen zeigt sich der immer größer werdende Absatzvorsprung von Dieselhybridfahrzeugen gegenüber den anderen Hybridfahrzeugen. Sehr auffällig ist zudem das starke Ansteigen der Verkaufszahlen von Brennstoffzellenfahrzeugen.

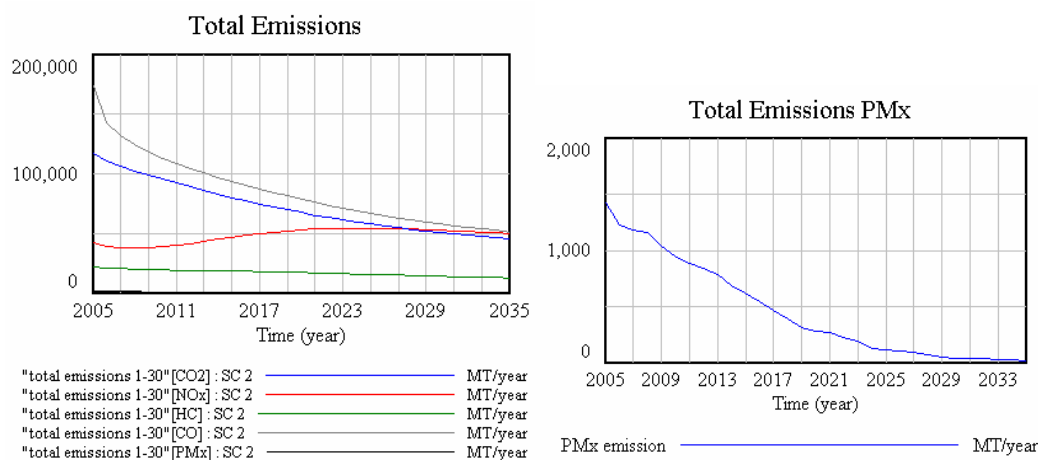


Abbildung 6-6: Emissionsentwicklung bei technischem Fortschritt

Bei der Betrachtung der Emissionen in Abbildung 6-6 ist eine deutliche Senkung der CO₂-, CO- und HC-Emissionen zu beobachten. Die CO₂- und CO-Emissionen reduzieren sich auf rund 500.000 MT pro Jahr, auf den gleichen Wert steigen jedoch die NO_x-Emissionen und liegen somit über dem Wert von 2005, nachdem sie in den ersten Jahren leicht reduziert werden konnten. Die Partikelbelastung wird durch den Einsatz von Partikelfiltern in Neufahrzeugen kontinuierlich reduziert und ist zu Beginn der 2030er Jahre kaum noch vorhanden.

Die Emissionsziele werden wesentlich besser erreicht als noch in Szenario 1. Jedoch müssen vor allem die Stickoxidemissionen dauerhaft gesenkt werden. Die Senkung der Partikelemissionen verläuft zwar kontinuierlich, eine schnellere Reduktion ist jedoch erstrebenswert.

In den folgenden Szenarien wird gezielt der Einfluß einzelner Rahmenbedingungen untersucht. Aufgrund der expliziten Berücksichtigung des technischen Fortschritts, wird Szenario 2 daher als Referenz herangezogen.

6.2.3 Szenario 3: Verbindliche Nutzung von alternativen Kraftstoffen

Mit diesem Szenario wird gegenüber dem Szenario 2 die Zusammensetzung des Kraftstoffes nach EU-Richtlinie 2003/30/EG simuliert (siehe Abschnitt 2.3.3). Das Eintreffen der heutigen Prognosen für die Umsetzung der Kraftstoffentwicklung wird im Modell über den Engpaß ‚Kraftstoffverfügbarkeit‘ reguliert. Über den Schieberegler (fuel availability switch) kann das Eintreten der Prognose variiert werden (siehe Abbildung 5-28 in Abschnitt 5.4.7.5). Im Rahmen der Untersuchungen reicht diese vom Nichteintreffen (0) bis zum 1,5-fachen Eintreffen der Prognosen. Bei der Einstellung des Schiebereglers auf 0,5 sind am Ende des Simulationszeitraums nur halb so viele alternative Kraftstoffe verfügbar, wie in Tabelle 5-13 prognostiziert. Bei der Schalterposition '1' in Abbildung 6-7 werden die Mischungsanteile zwischen BTL- und GTL- und Erdölkraftstoffen gemäß der Richtlinie umgesetzt. Bei '1,5' ist der Anteil an (CO₂-neutralen) BTL- und GTL-Kraftstoffen pro Liter Benzin höher, somit sind die spezifischen CO₂-Emissionen geringer.

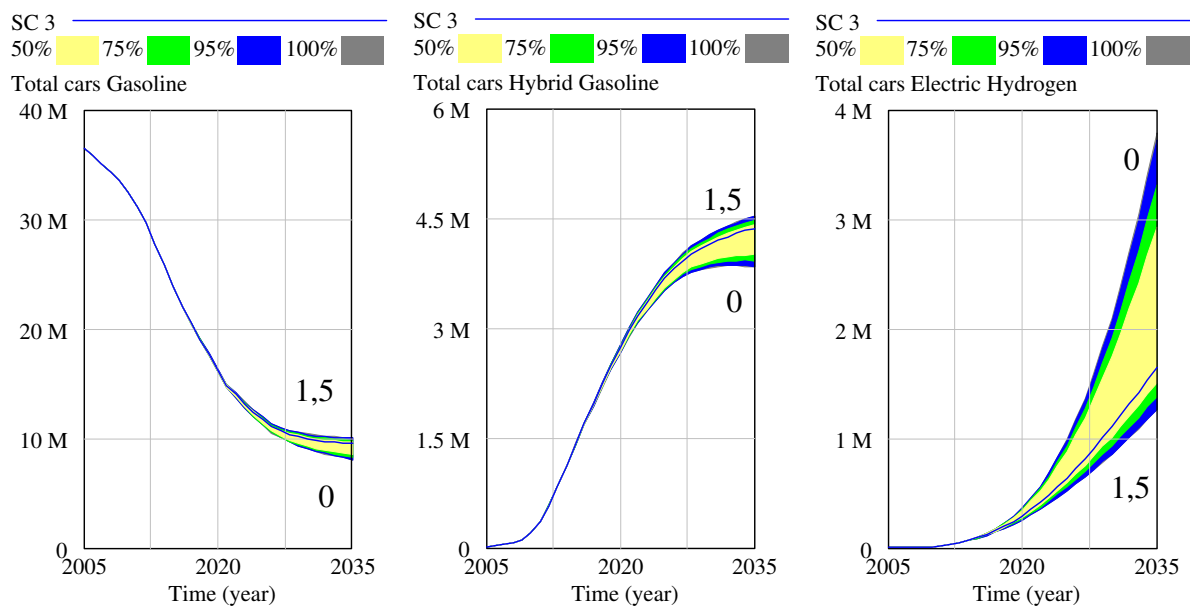


Abbildung 6-7: Fahrzeugbestände mit Beeinflussung durch die Kraftstoffstrategie

Wie in Abbildung 6-7 sichtbar, sinken in diesem Szenario rein benzingetriebene Fahrzeuge, Fahrzeuge mit einer Kombination aus Otto- und Elektromotor steigen. Die Bestände der anderen Fahrzeugtypen werden nur unwesentlich beeinflusst. Das exponentielle Wachstum der Brennstoffzellenfahrzeuge wirkt auf den Betrachter zunächst stärker, als es tatsächlich ist, da bis etwa 2010 noch keine Brennstoffzellenfahrzeuge existieren und ein verstärkter Absatz erst ab ungefähr 2020 einsetzt. Das starke Ansteigen bei '0' bedeutet dabei, daß neben Wasserstoff als alternativer Energiequelle keine GTL- oder BTL-Kraftstoffe zum Einsatz kommen. Auf-

grund der EU-Richtlinie wird dieser Fall jedoch kaum eintreten. Bei '1' oder '1,5' ist das Wachstum nicht mehr so stark; gegenüber 2020 gibt es im Jahr 2035 gerade 3-mal so viele Brennstoffzellenantriebe – insgesamt lediglich 1,5 Millionen Fahrzeuge. Die farbigen Flächen markieren die Genauigkeit der Prognose. Das abgebildete Vertrauensintervall schließt den Bereich um den geschätzten Wert ein, der mit einer festgelegten Wahrscheinlichkeit die Prognose trifft. So liegen in der gelben Fläche in Abbildung 6-7 50 Prozent aller Werte, in der grünen Fläche 75 Prozent und in der blauen Fläche 95 Prozent. Die festgelegten Konfidenzintervalle gelten auch für die folgenden Abbildungen 6-8, 6-9, 6-11, 6-22 und 6-23.

Der zeitliche Verlauf der Wasserstoffverfügbarkeit als Kraftstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge bleibt unverändert, da die Kraftstoffverfügbarkeit zum heutigen Zeitpunkt nur grob geschätzt werden kann. Gleichwohl ist unbestritten, daß die Wasserstoffwirtschaft langfristig (50 bis 100 Jahre) die heutige Basis ‚Erdöl‘ ersetzen wird, da es dann kaum noch rentable Erdölressourcen gibt. Zur Deckung des zukünftigen Bedarfs müssen neue Kapazitäten und Herstellungsverfahren eingesetzt werden, welche unter anderem auch Biomasse als Grundstoff für die H₂-Produktion verwenden. Hierbei wäre bei Bedarf also eine Umstellung der BTL-Produktion auf eine H₂-Produktion vorstellbar. Die Entwicklung einer Wasserstoffinfrastruktur für den mobilen Sektor wird indes gerade zu Beginn nur einen Teil der gesamten H₂-Infrastruktur darstellen; stationäre Brennstoffzellen werden noch vor den mobilen Brennstoffzellen kostengünstig verfügbar sein und zum Einsatz kommen. Die Verfügbarkeit des für die Fahrzeuge benötigten Wasserstoffs sollte demnach (im betrachteten Zeitraum) keinen Engpaß darstellen, da noch vor dem Einsetzen eines „Booms“ von Brennstoffzellenfahrzeugen die Wasserstoffversorgung für stationäre Anwendungen gewährleistet werden muß.

Den Engpaß für Brennstoffzellenfahrzeuge stellen vielmehr die Entwicklungsgeschwindigkeit und die Kostenentwicklung für die mobilen Brennstoffzellen dar. In Abschnitt 2.3.7 sind die prognostizierten Entwicklungszeiträume und die Entwicklung der Kosten angegeben, wobei das Simulationsmodell eher an einer moderaten Kostenentwicklung orientiert ist. Die sich hieraus ergebende Kaufpreisentwicklung für Brennstoffzellenfahrzeuge ist in Abschnitt 5.4.2 erläutert.

Die Einführung von Brennstoffzellenfahrzeugen im Jahr 2020 bis 2035 ist so lediglich der Beginn einer zunehmenden Substitution von konventionellen Fahrzeugen durch Fahrzeuge der kommenden Technologie. Langfristig dürfte es also mehr Brennstoffzellenfahrzeuge geben, so daß der in der Arbeit betrachtete Zeitraum lediglich den Beginn einer typischen s-förmigen Wachstumskurve darstellt, welche zunächst exponentiell ansteigt, sich dann stabilisiert und schließlich ein Sättigungsniveau erreicht.

Es zeigt sich in Abbildung 6-8, daß die Kraftstoffentwicklung auf die gesamten Emissionen von CO₂, HC und CO einen deutlich reduzierenden Einfluß ausübt, daß die Emissionen von NO_x und Partikeln jedoch kaum gesenkt werden.

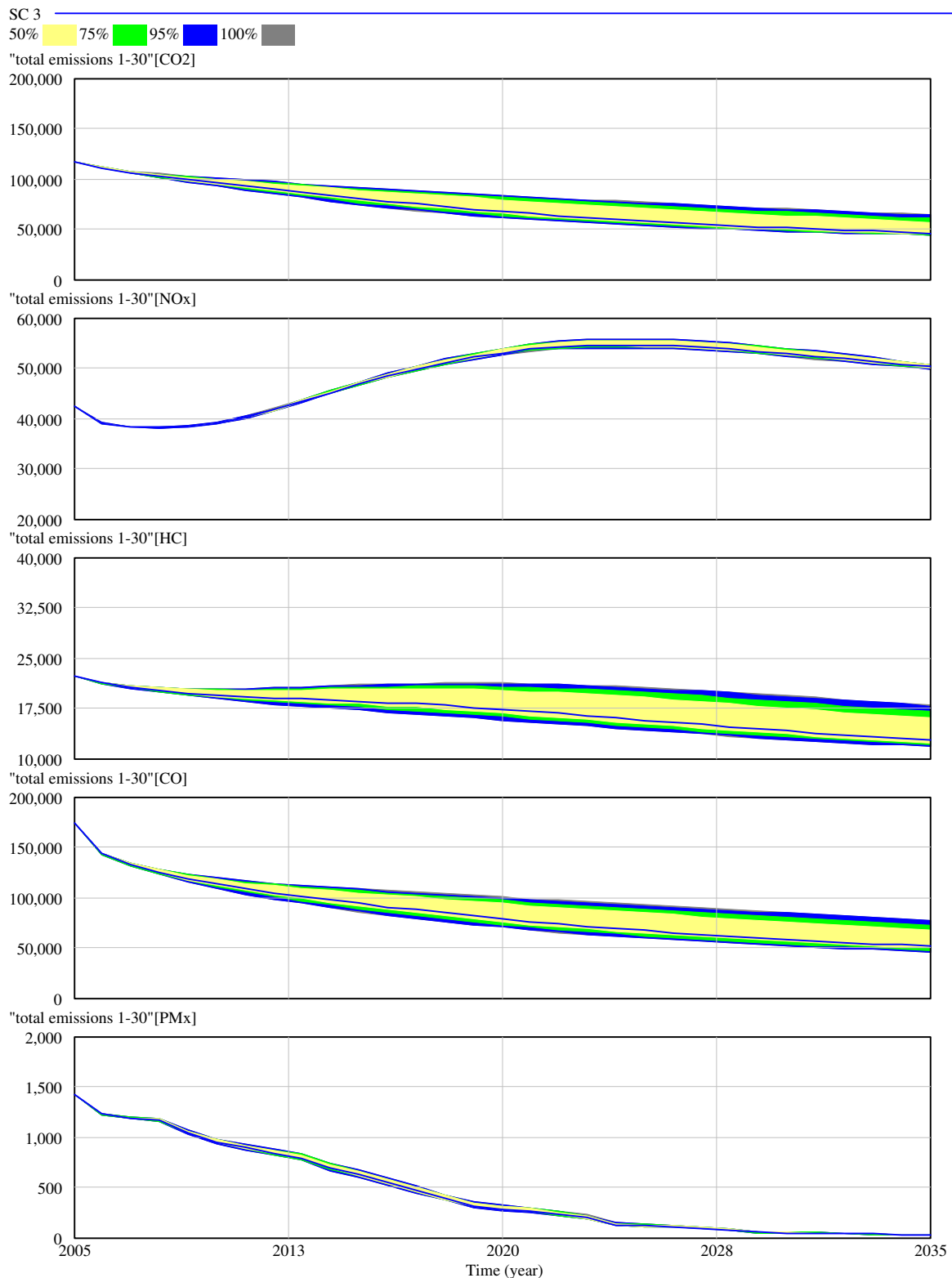


Abbildung 6-8: Einfluß der Kraftstoffstrategie auf die Emissionsentwicklung

Werden die heutigen Prognosen übertroffen, so ist der Effekt einer weiteren Emissionsminderung relativ gering verglichen mit der Wirkung der Kraftstoffstrategien bis zum Erreichen der prognostizierten Anteile. Dieser Bereich ist in Abbildung 6-8 oberhalb der blauen Linie (exaktes Eintreffen der Prognosen) zu erkennen. Der Einsatz von ordnungspolitischen Instrumen-

ten, wie der EU-Richtlinie 2003/30/EG [SRU 2005, S. 183] zur Einführung von Kraftstoffen aus Biomasse, kann somit zum Erreichen der Ziele einer Reduzierung der CO₂-, HC- und CO-Emissionen beitragen. Partikel- und NO_x-Emissionen können durch den Einsatz der Kraftstoffstrategien jedoch kaum beeinflusst werden. Von der CO₂-emissionssenkenden Wirkung der alternativen Kraftstoffe, vor allem der BTL-Kraftstoffe, profitieren besonders alle verbrauchsintensiveren Fahrzeugantriebe mit Ottomotor. Ihre Bestandsverstärkung wirkt sich vorwiegend zu Lasten der Bestandsentwicklung der Brennstoffzellenfahrzeuge aus, da nach den getroffenen Annahmen die Entwicklung des Gesamtfahrzeugbestandes unverändert bleibt.

6.2.4 Szenario 4: Verringerung des Kraftstoffverbrauchs

In diesem Szenario wird gegenüber Szenario 2 der Kraftstoffverbrauch variiert, um damit implizit Emissionsreduzierungen zu erreichen.

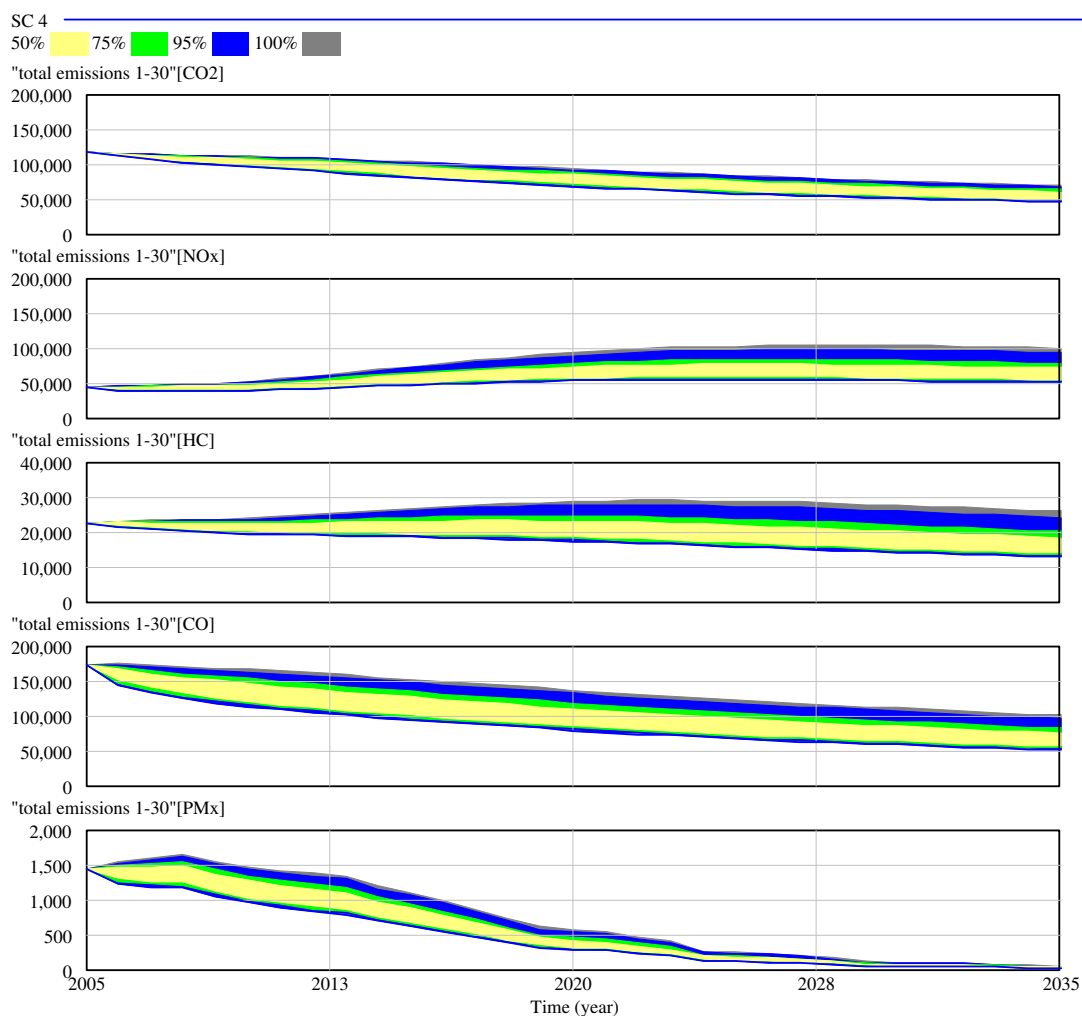


Abbildung 6-9: Einfluß der technischen Verbrauchsreduzierung auf Emissionsentwicklungen

Untersucht werden die Fälle ‚keine Verbesserung‘ (0) bis ‚volle Ausnutzung‘ (1) der technisch erreichbaren Verbrauchsreduzierungen. Die Ausnutzung des Potentials wird vor allem durch den Einsatz ordnungspolitischer Instrumente, wie der Verschärfung der Abgasgrenz-

werte für Neufahrzeuge, gefördert. Der Einfluß der Verbrauchsreduzierung trägt, wie in Abbildung 6-9 ersichtlich, bei allen untersuchten Emissionsarten zu einer wesentlichen Senkung der Emissionsbelastung bei.

Dies ist umso beachtlicher, da der Anteil der alternativen Antriebsstrategien ab dem Jahr 2020 deutlich höher läge, wenn die Verbrauchsreduzierungen nicht umgesetzt würden. Dies läßt sich damit erklären, daß die konventionellen Antriebskonzepte mit ihrem höheren Ausgangsverbrauch im Jahr 2005 von der prozentualen Verbrauchsreduzierung stärker profitieren als die insgesamt verbrauchsärmeren Hybridfahrzeuge, da sich ihr Verbrauchsvorteil pro Fahrzeug insgesamt reduziert (siehe Abbildung 6-10).

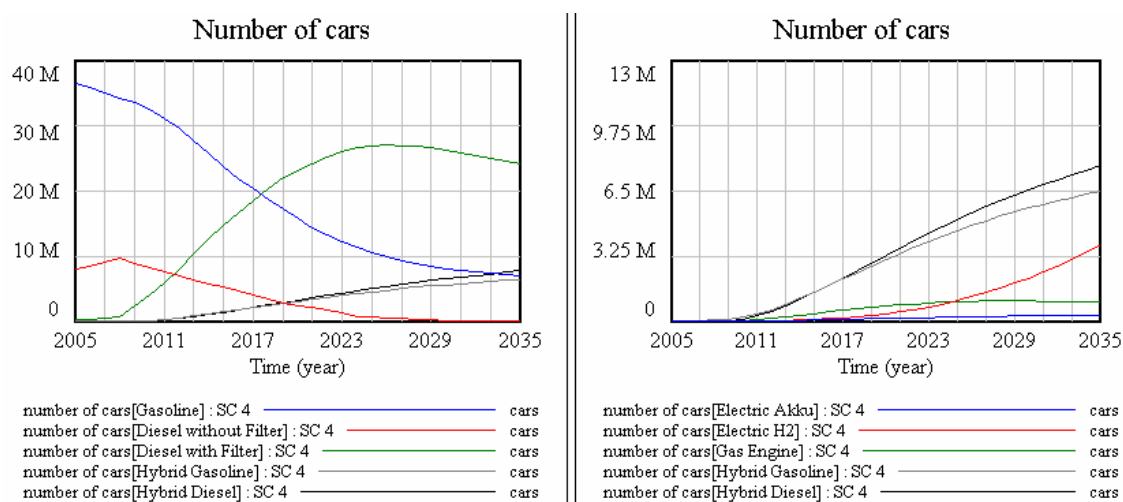


Abbildung 6-10: Fahrzeugbestände ohne Ausnutzung der technischen Verbrauchsreduzierung

Die höheren Bestände der konventionellen Fahrzeuge bei Ausnutzung des technischen Verbrauchsreduktionspotentials führen auch zu einem deutlichen Rückgang der Bestände an Brennstoffzellenfahrzeugen. Werden ohne Verbrauchsreduzierungen im Jahr 2035 fast 4 Millionen Fahrzeuge betrieben, so sind es mit dieser Verbesserung lediglich 1,5 Millionen Fahrzeuge. Der Vorteil der Emissionsfreiheit der Brennstoffzellenfahrzeuge besitzt in diesem Falle weniger Relevanz (siehe Abbildung 6-11).

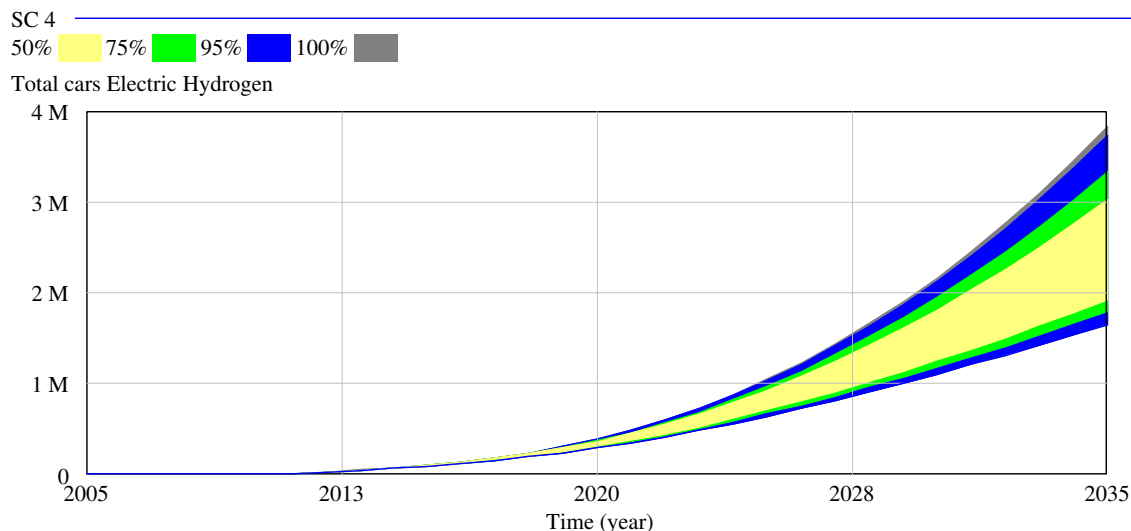


Abbildung 6-11: Einfluß der technischen Verbrauchsreduzierung auf den Bestand der Brennstoffzellenfahrzeuge

Das Erreichen der Emissionsziele wird durch den Einsatz von ordnungspolitischen Instrumenten zur Verbesserung der Kraftstoffeffizienz deutlich vorangetrieben, wobei die Marktentwicklung der alternativen Antriebsstrategien hierdurch eher behindert wird. Daher ist es sinnvoll, diese Instrumente durch die schrittweise Einführung immer strengerer Abgasgrenzwerte für Neufahrzeuge zu flankieren.

6.2.5 Szenario 5: Variation der durchschnittlichen Fahrleistung pro Jahr

In diesem Szenario wird gegenüber dem Szenario 2 die durchschnittliche Fahrleistung der einzelnen Fahrzeuge pro Jahr um 100 km reduziert. Somit wird der in der Literatur verbreiteten Annahme Rechnung getragen, daß die steigende Anzahl an Fahrzeugen mit einer zunehmend geringeren Auslastung dieser einhergeht [SRU 2005, S. 84; Stern 2003; IFMO 2005, S. 44].

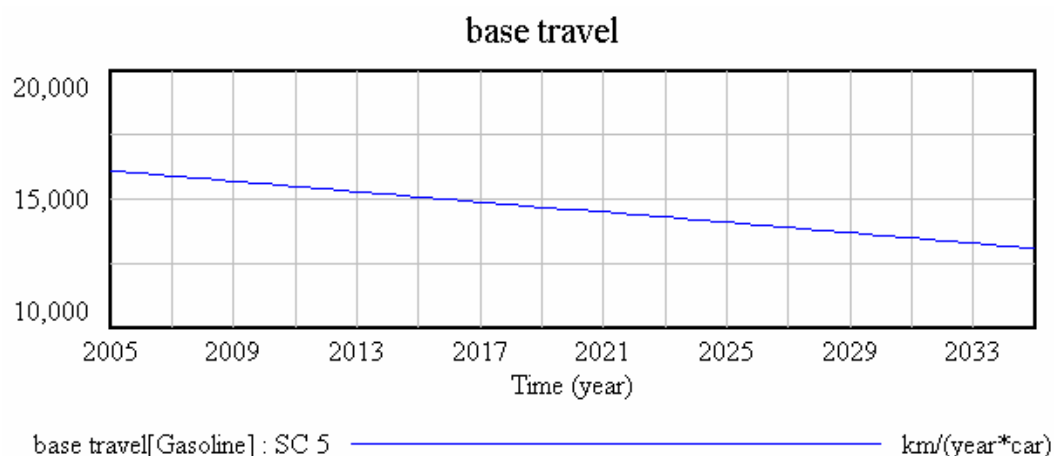


Abbildung 6-12: Veränderung der durchschnittlichen Fahrleistung pro Fahrzeug

Der Verlauf des Grundwertes für die Fahrleistung pro Fahrzeug ist in Abbildung 6-12 dargestellt. Abbildung 6-13 zeigt, daß die Veränderung der Fahrleistung – beispielhaft angegeben

für die beiden letzten Jahre des Simulationszeitraums 2034 und 2035 – keinen signifikanten Einfluß auf die Zusammensetzung des Fahrzeugbestandes hat.

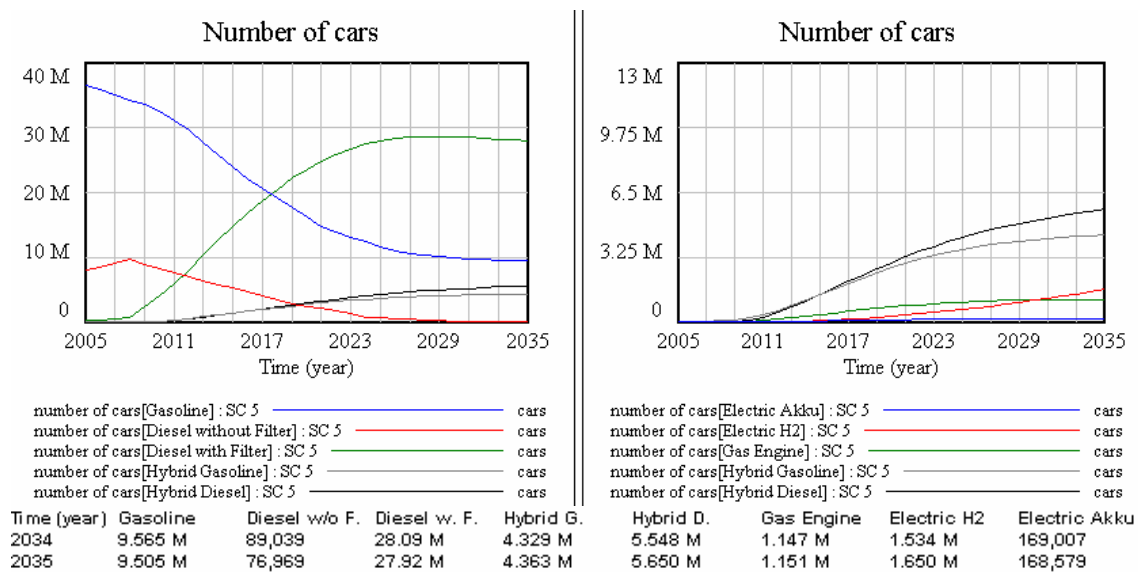


Abbildung 6-13: Fahrzeugbestände bei sich jährlich verringernder Fahrleistung

Bei der Analyse der Emissionswerte im Vergleich zu Szenario 2 zeigt sich in Abbildung 6-14, daß die Verringerung der spezifischen Fahrleistung zu einer proportionalen Reduktion der Emissionen führt. Da sich die Zusammensetzung des Fahrzeugbestandes nicht ändert, ist dieser Zusammenhang zwingend. Eine Unterstützung alternativer Antriebsstrategien findet nicht statt.



Abbildung 6-14: Vergleich der Emissionen von Szenario 5 und Szenario 2

6.2.6 Szenario 6: Steigerung der Preise für fossile Kraftstoffe

In dem letzten Szenario mit Variation der exogenen Rahmenbedingungen wird ausgehend von Szenario 2 der Einfluß von stärker ansteigenden Wareneinstandspreisen für fossile Kraftstoffe untersucht. Hierbei wird die Zeitdauer für eine Preisverdoppelung von ursprünglich zwanzig auf zwölf Jahre reduziert (siehe Abbildung 6-15).

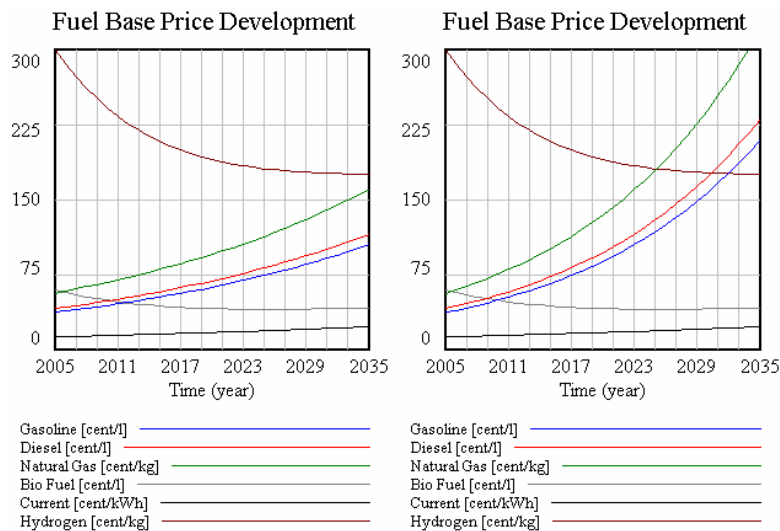


Abbildung 6-15: Wareneinstandspreisentwicklung für Kraftstoffe in Szenario 2 und Szenario 6

Durch die Preiserhöhung der Kraftstoffe steigen, wie in Abbildung 6-16 erkennbar, mit zunehmender Simulationszeit die Verkaufszahlen der Fahrzeuge mit alternativen Antrieben verstärkt an. In den ersten Jahren der Simulation sind die Veränderungen jedoch zunächst gering.

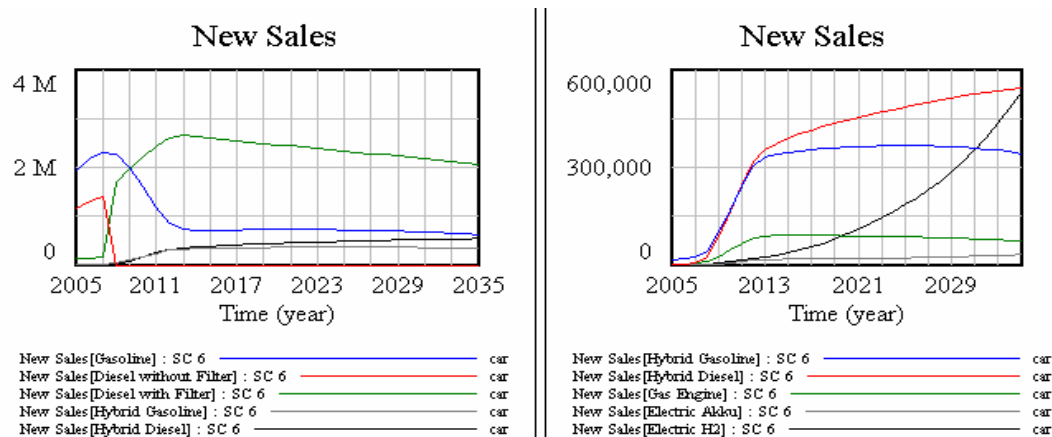


Abbildung 6-16: Fahrzeugverkäufe bei stärkerer Kraftstoffpreissteigerung

Ab den 2020er Jahren sind bei den konventionellen Fahrzeugen Absatzeinbußen aufgrund der Preiserhöhung der fossilen Kraftstoffe erkennbar. Die Absatzzahlen der Erdgas- und Hybridfahrzeuge mit Ottomotor verbessern sich im Vergleich zu Szenario 2 zunächst leicht aufgrund der besseren Verbrauchswerte, fallen ab Ende der 2020er Jahre jedoch deutlich ab. Auch die alternativen Kraftstoffentwicklungen führen zu diesem Zeitpunkt nicht mehr zu einer Stabilisierung der Absatzzahlen. Die Verkaufszahlen der rein elektrischen Antriebsstrategien liegen deutlich über denen in Szenario 2. Vor allem die Verkaufszahlen der Brennstoffzellenfahr-

zeuge steigen während des Simulationszeitraumes stark an. Im Jahr 2029 hat sich die Anzahl der Neuverkäufe bereits verdoppelt. Insgesamt führt die stärkere Preiserhöhung zu einer vorzeitigen Marktdurchdringung der Wasserstofftechnologie.

Die Analyse der Emissionen ergibt, daß eine verstärkte Kraftstoffpreissteigerung gegenüber Szenario 2 praktisch keinen Einfluß auf die Emissionsbelastungen ausübt. Lediglich gegen Ende des Simulationszeitraumes ist durch den verstärkten Marktanteil der Brennstoffzellenfahrzeuge eine geringfügige Emissionssenkung zu beobachten (siehe Abbildung 6-17).

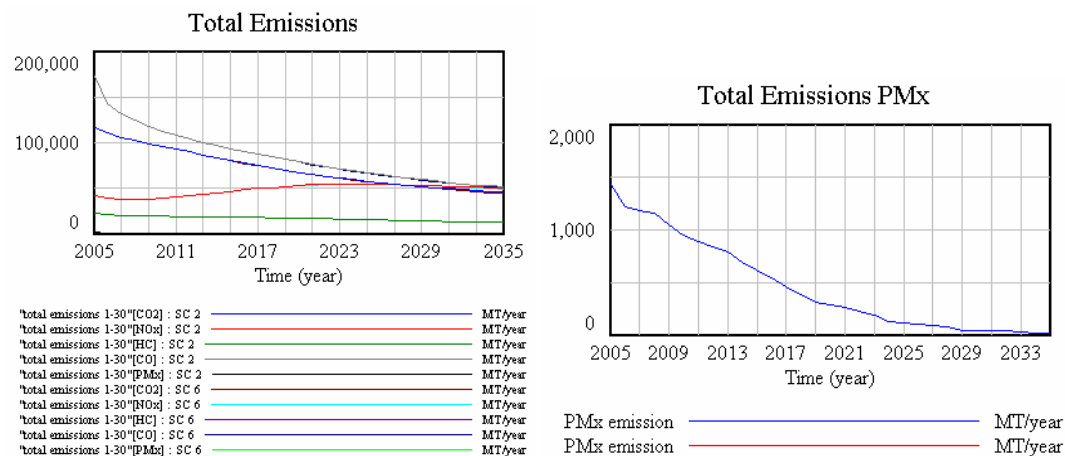


Abbildung 6-17: Vergleich der Emissionen bei stärkerer Kraftstoffpreissteigerung

In den weiteren Szenarien wird daher auf eine Variation der Wareneinstandspreise für fossile Kraftstoffe verzichtet, da der Einfluß für das Erreichen des Emissionsziels minimal ist.

6.3 Szenarien mit Einsatz ökonomischer Instrumente

In den folgenden Szenarien wird der Einfluß der ökonomischen Instrumente der Umweltpolitik auf die Marktdurchdringung der alternativen Antriebsentwicklung untersucht und beurteilt, ob die Emissionsziele durch den Einsatz ökonomischer Instrumente besser erreicht werden können. Dabei müssen auch die fiskalischen Ziele erreicht werden. Die exogenen Rahmenbedingungen sind bei den folgenden Untersuchungen identisch mit denen des Szenarios 2. Dieselfahrzeuge werden in jedem Szenario ab dem Jahr 2008 mit einem serienmäßigen Partikelfilter ausgeliefert.

6.3.1 Szenario 7: Wirkung der Kfz-Steuerungstellung auf CO₂-Emissionsbasis

In diesem Szenario wird die Bemessungsgrundlage der Kfz-Steuer auf die CO₂-Emissionen der Fahrzeugtypen umgestellt. Die Steuersätze werden gemäß dem in Abschnitt 5.4.10 beschriebenen Verfahren an den Stand der Technik angepaßt. Bei der Durchführung der Simulation wird auf das ‚Advanced-Modell‘ zurückgegriffen.

Im Vergleich zu Szenario 2 steigt vor allem die Anzahl der elektrisch angetriebenen Fahrzeuge deutlich an (siehe Abbildung 6-18). Besonders die Anzahl der Brennstoffzellenfahrzeuge nimmt zu und beträgt im Jahr 2035 bereits 4,2 Millionen. Die Anzahl der Hybridfahrzeuge

steigt zunächst bis zum Jahr 2026 auf ein Niveau von 4,2 (Ottomotor) bzw. 4,8 Millionen Fahrzeuge (Diesel) schneller an und fällt danach leicht ab. Die Bestandszahlen der konventionellen Fahrzeuge nehmen einen ähnlichen Verlauf wie in Szenario 2 an, fallen allerdings minimal geringer aus.

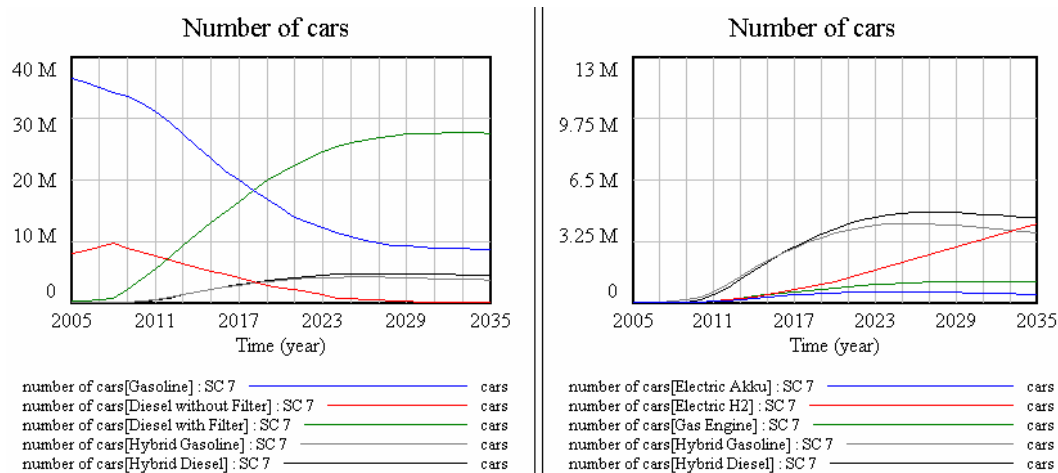


Abbildung 6-18: Fahrzeugbestandsentwicklung nach Umstellung der Kfz-Steuer

Bei Betrachtung der Neuverkäufe in Abbildung 6-19 wird ersichtlich, daß die verstärkte Marktdurchdringung der Brennstoffzellenfahrzeuge um das Jahr 2015 mit einer kontinuierlichen Steigerung der Verkaufszahlen einhergeht. Die Verkaufszahlen der Erdgasfahrzeuge stagnieren ab dem Jahr 2013, nachdem diese zunächst eine ähnliche Steigerung aufgewiesen haben wie die Brennstoffzellenfahrzeuge. Aufgrund des Einsatzes der alternativen Kraftstoffentwicklung setzt der Rückgang der Verkaufszahlen von konventionellen Dieselfahrzeugen nach dem Jahr 2013 nicht abrupt ein, sondern wird gedämpft.

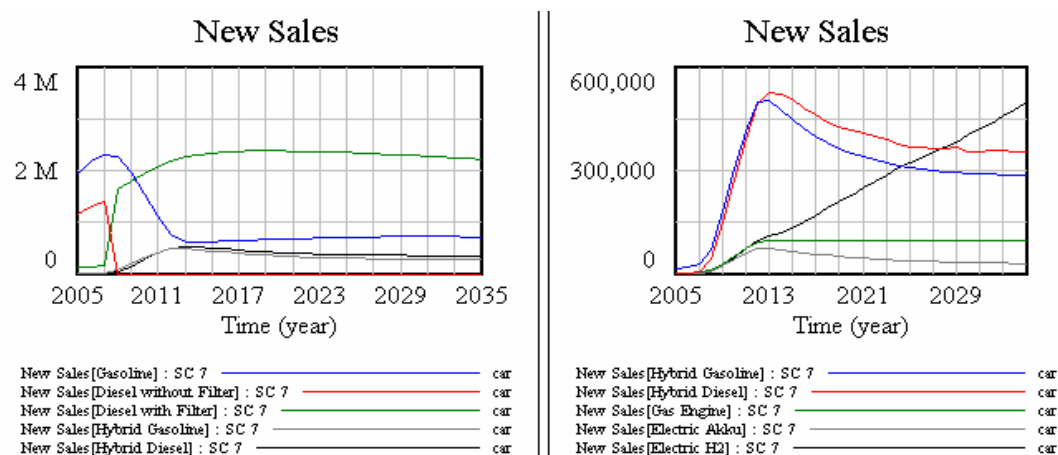


Abbildung 6-19: Entwicklung der Neuverkäufe bei Kfz-Steuerumstellung

Die Emissionsbelastungen von CO₂, HC, CO und NO_x können durch die Umstellung der Kfz-Steuer minimal reduziert werden. Bei den Partikelemissionen wird gegenüber Szenario 2 keine Verbesserung erzielt (siehe Abbildung 6-20).

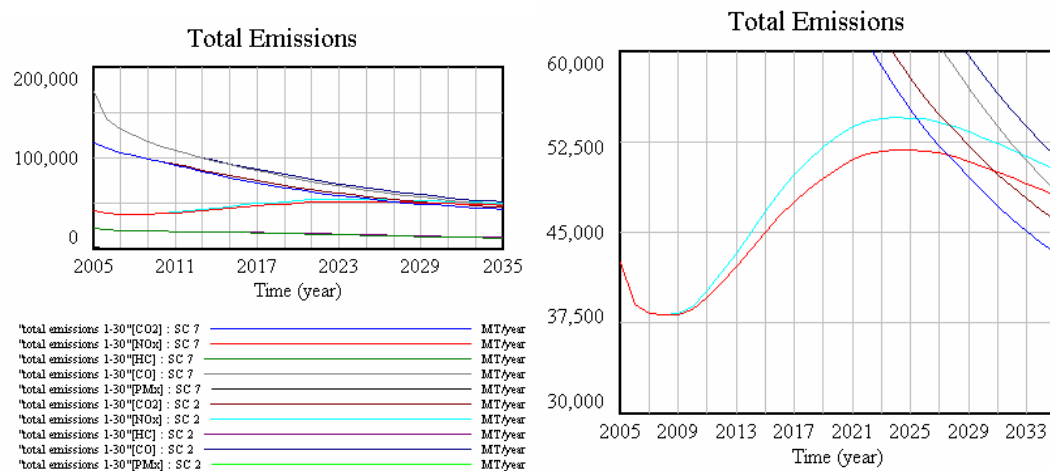


Abbildung 6-20: Emissionsentwicklung mit Detailansicht bei Kfz-Steuerumstellung

Die fiskalische Wirkung der Kfz-Steuerumstellung ist in Abbildung 6-21 dargestellt. Die Einnahmeverluste, welche über die Ökosteuererinnahmen ausgeglichen werden, sind bei der schrittweisen Anpassung der Kfz-Steuersätze etwa halb so groß, wie bei einem Verzicht auf die Anpassung der Steuerfreiheitsgrenze an den Stand der Technik.

CO₂ Vehicle Tax Loss

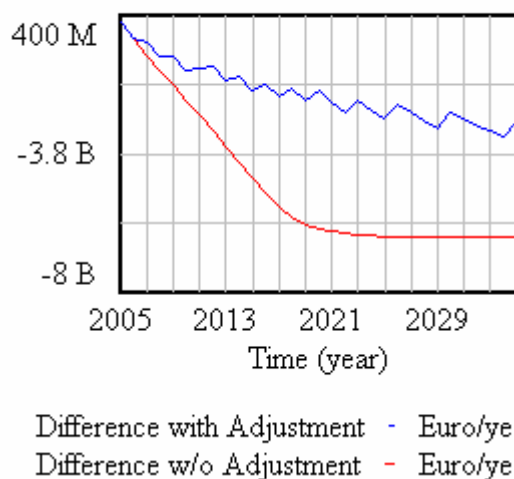


Abbildung 6-21: Fiskalische Auswirkungen der Umstellung mit und ohne Steuersatzanpassung

Die Kfz-Steuerumstellung beschleunigt die Marktdurchdringung von alternativen Antrieben und führt somit zu einer weiteren Senkung der Emissionen mit Ausnahme der Partikelemissionen. Die Kosten dieser Umstellung infolge von Einnahmeverlusten müssen jedoch durch Einnahmen aus der Ökosteuer abgedeckt werden, um auch die fiskalischen Ziele erreichen zu können.

6.3.2 Szenario 8: Wirkung des Malus für Dieselfahrzeuge ohne Partikelfilter

Szenario 8 untersucht den Einfluß einer Maluszahlung für Dieselfahrzeuge ohne Partikelfilter. Die Halter solcher Fahrzeuge sollen dazu bewegt werden, ihr Fahrzeug mit einem Filter nachzurüsten, da sie sich auf diese Weise den Maluszahlungen entziehen können. Der Höhe des

Malus variiert in diesem Szenario zwischen 0 bis 800 Euro, der Standardwert beträgt 300 Euro. Alle Rahmenbedingungen entsprechen denen in Szenario 2.

In Abbildung 6-22 ist der Standardwert des Malus als blaue Linie dargestellt. Bei einem Malus von 800 Euro werden innerhalb des ersten Jahres, in dem die Nachrüstung technisch möglich ist, eine hohe Anzahl von Fahrzeugen nachgerüstet, was sich in einem sprunghaften Abfall im Bestand der Dieselfahrzeuge ohne Filter bemerkbar macht. Gleichzeitig steigt der Bestand an Dieselfahrzeugen mit Filter sprunghaft an, da die umgerüsteten Dieselfahrzeuge nun zu diesem Bestand gezählt werden. Ohne die Erhebung eines Malus nimmt der Bestand der Dieselfahrzeuge ohne Filter erst nach der serienmäßigen Ausstattung aller neuen Dieselfahrzeuge kontinuierlich ab und verläuft auf einem wesentlich höheren Niveau. Ein sprunghafter Anstieg der Dieselfahrzeugbestände mit Filter bleibt aus.

Die Partikelemissionen (total PM_x emission) können durch die Einführung des Malus deutlich gesenkt werden. Bei einem Malus von 800 Euro sinken die Partikelemissionen innerhalb eines Jahres auf ein Fünftel des Ausgangswertes ab. Ohne Malus bleibt diese sprunghafte Reduktion aus. Die blaue Linie in Abbildung 6-23 zeigt die Wirkung eines Malus von 300 Euro, wie er in den nachfolgenden Szenarien verwendet wird. Das ökonomische Instrument der Maluszahlungen stellt ein wirkungsvolles Mittel zur Reduktion der Partikelemissionen dar.

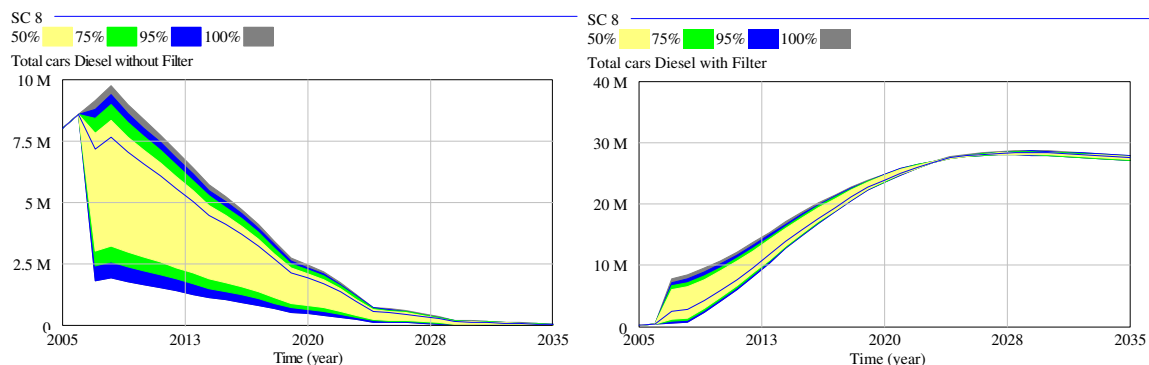


Abbildung 6-22: Dieselfahrzeugbestände ohne und mit PM_x -Filter bei Einführung eines Malus

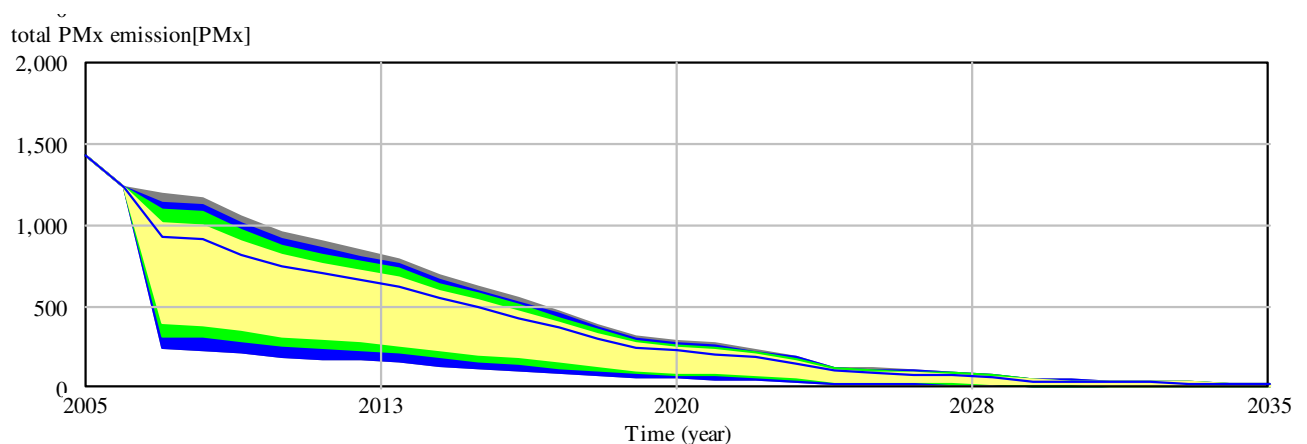


Abbildung 6-23: Entwicklung Partikelemissionen bei Variation der Höhe des Filter-Malus

6.3.3 Szenario 9: Homogenes Modell konstanter Förderungssumme

In diesem Szenario wird das Autopilot-Modell ‚Requal‘ aus Abschnitt 5.4.12 eingesetzt. Es erfolgt der Einsatz eines Filtermalus in Höhe von 300 Euro. Die Kfz-Steuer wird auf CO₂-Emissionsbasis umgestellt. Die Höhe der gesamten Förderungssumme der Bonuszahlungen auf den Kaufpreis soll 7 Milliarden Euro betragen, wobei jedes förderungswürdige Fahrzeug die Bonuszahlung in gleicher Höhe erhält. Die maximale Bezuschussung des Haushaltes durch die Ökosteuererinnahmen beträgt 2,1 Milliarden Euro (Faktor von 0,3 der Fördergesamtsumme). Die Einhaltung dieser Vorgaben erfolgt durch die automatische Steuerung des Instrumenteneinsatzes mittels des Autopiloten gemäß der in Abschnitt 5.4.12.1 und 5.4.12.2 beschriebenen Politik.

Die Höhe der durchschnittlichen Bonus- und Maluszahlungen ist in Abbildung 6-24 dargestellt. Bis zum Jahr 2012 erfolgt eine starke Anhebung der Maluszahlungen, um die steigende Gesamtsumme der Bonuszahlungen auf das angesteuerte Ziel von 7 Millionen Euro auszugleichen.

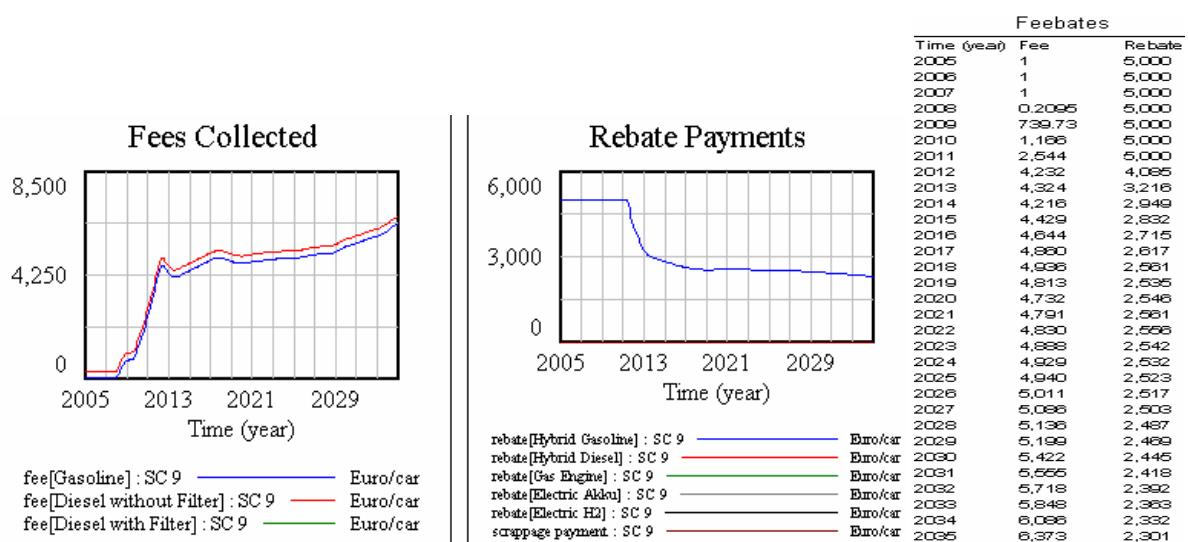


Abbildung 6-24: Verlauf der Bonus- und Maluszahlungen durch Autopilotsteuerung ‚Requal‘

Systembedingt kann der Autopilot die Maluszahlungen nur mit einer gewissen Reaktionszeit an die sich ändernden Fahrzeugbestände anpassen, so daß zunächst immer ein bestimmter Überschuß/ Fehlbetrag auftritt (Current Cash Balance). In Abbildung 6-25 ist das Nachlaufen der Einnahmen aus den Maluszahlungen gegenüber den Auszahlungen der Bonuszahlungen zu sehen, sowie die sich daraus ergebenden Schwankungen im Haushalt.

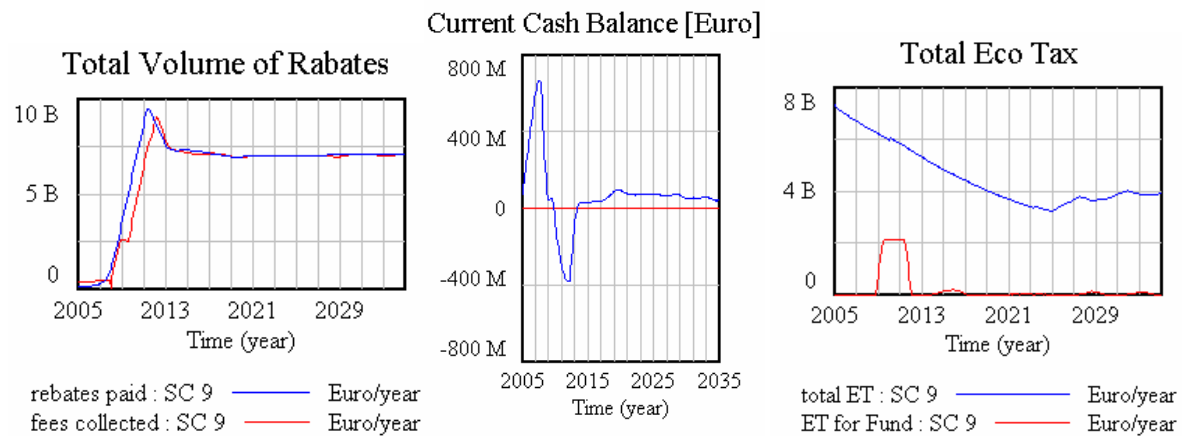


Abbildung 6-25: Gesamte Förderungszahlungen, Haushaltslage und Ökosteuererinnahmen

Mit dem Erreichen der angesteuerten Gesamtfördersumme treten kaum noch Schwankungen auf und es werden dann bei Bedarf nur noch geringe Unterstützungszahlungen aus den Ökosteuererinnahmen notwendig, während zwischen 2009 und 2012 die maximale Bezuschussung des Haushaltes in Höhe von 2,1 Milliarden Euro ausgeschöpft werden muß. Die Anpassung der Ökosteuersätze, die über die Kraftstoffpreise ebenfalls eine Lenkungswirkung ausüben, ist in Abbildung 6-26 dargestellt.

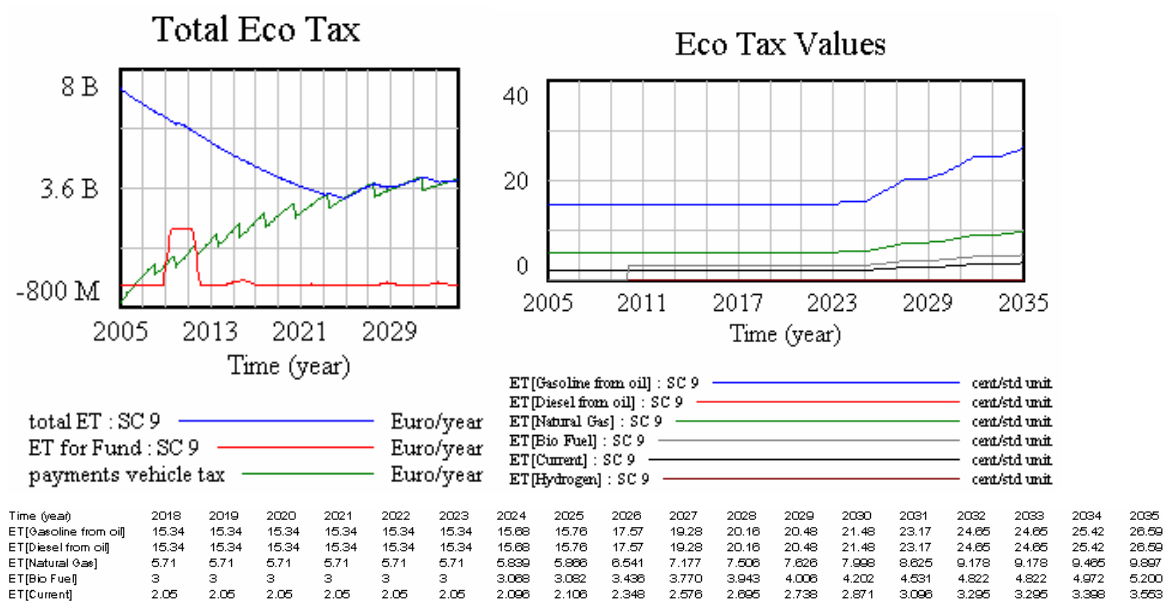


Abbildung 6-26: Anpassung der Ökosteuersätze durch Autopiloten 'Requal'

Bedingt durch die Ausgleichszahlungen für die Kfz-Steuerumstellung müssen die Steuersätze ab dem Jahr 2024 angehoben werden. Die Unterstützungszahlungen für den Haushalt der Bonus- und Maluszahlungen verursachen hier keine Anhebung der Steuersätze. Die Zusammensetzung des Fahrzeugbestandes erfährt durch diese Politik erhebliche Veränderungen gegenüber dem Szenario 2 (siehe Abbildung 6-27).

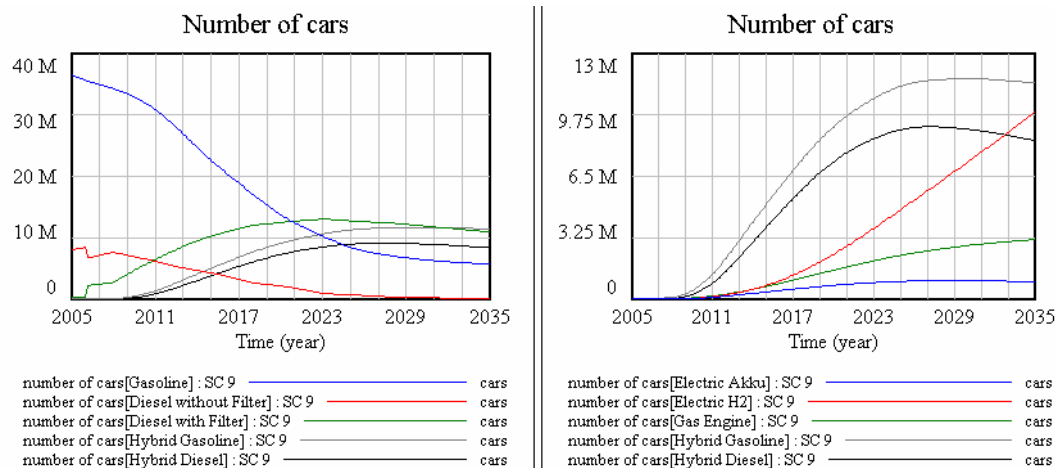


Abbildung 6-27: Fahrzeugbestände bei homogenen Bonus- und Maluszahlungen

Besonders deutlich wird dies bei der Analyse des Dieselfahrzeugbestandes. Dieser erreicht im Jahr 2023 nur noch ein Maximum von 13 Millionen Fahrzeugen gegenüber 28 Millionen Fahrzeugen in Szenario 2. Die Bestandskurve der Ottomotorfahrzeuge weist einen identischen Verlauf wie in Szenario 2 auf, jedoch fällt der Bestand schneller und erreicht ein niedrigeres Niveau von rund 6 Millionen Fahrzeugen. Der Bestand an Hybridfahrzeugen steigt wesentlich stärker und erreicht ein Niveau insgesamt 20,7 Millionen Fahrzeugen im Jahr 2028. Die Hybridfahrzeuge mit Ottomotor nehmen nun einen größeren Marktanteil ein als diejenigen mit Dieselmotor. Der Bestand an Brennstoffzellenfahrzeugen steigt kontinuierlich an und erreicht am Ende der Simulation 9,75 Millionen Fahrzeuge, was gegenüber Szenario 2 einer Verzehnfachung entspricht. Auch die Anzahl der Erdgasfahrzeuge steigt kontinuierlich an und erreicht 3,25 Millionen Fahrzeuge im Jahr 2035. Obwohl sich der Bestand an Elektrofahrzeugen mit Akkumulator ebenfalls vervielfacht hat, haben diese Fahrzeuge nach wie vor eine Nischenstellung am Markt.

Die Entwicklung der Neuverkäufe in Abbildung 6-28 unterstützt die gewonnenen Erkenntnisse und zeigt deutlich, daß Brennstoffzellenfahrzeuge am Ende der Simulation den höchsten Anteil bei den Neuverkäufen einnehmen.

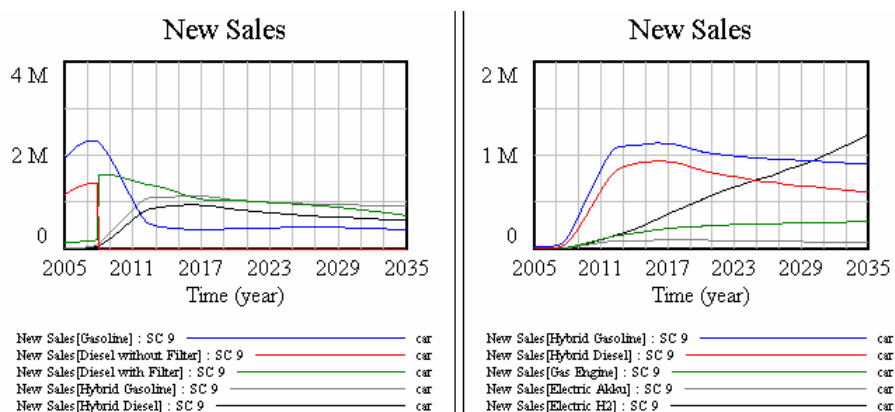


Abbildung 6-28: Neuverkäufe bei homogenen Bonus- und Maluszahlungen

Alle Emissionen sinken im Vergleich zu Szenario 2 deutlich. Die NO_x -Emissionen liegen bis zum Jahr 2018 zunächst ein wenig über dem Niveau von Szenario 2, fallen danach jedoch deutlich ab und reduzieren sich bis zum Jahr 2035 um über 25 Prozent. Dies ist vor allem auf den geringeren Bestand an Dieselfahrzeugen zurückzuführen (siehe Abbildung 6-29).

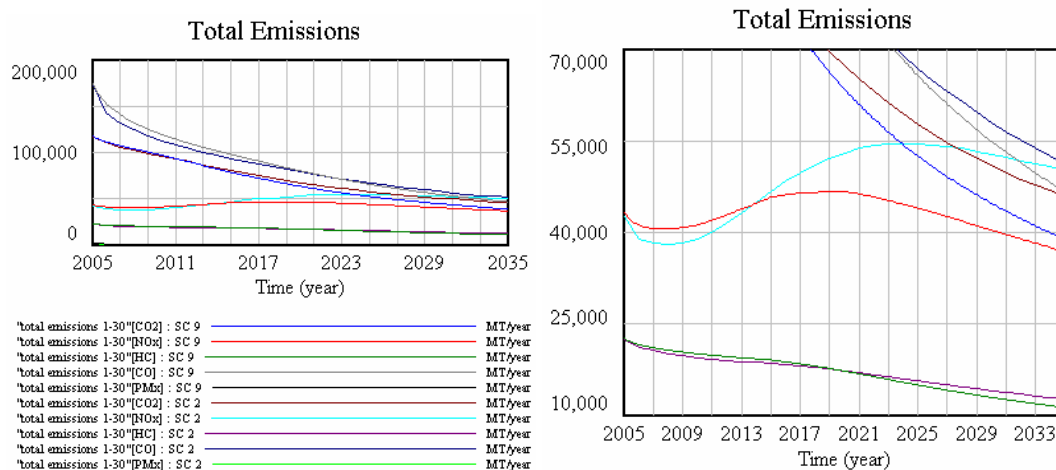


Abbildung 6-29: Emissionen bei homogenen Bonus- und Maluszahlungen

Die Höhe von 7 Milliarden Euro Fördersumme stellt die obere Finanzierungsgrenze dar. Eine Erhöhung auf 8 Milliarden Euro führt zu dem in Abbildung 6-30 dargestellten Verlauf. Die benötigten Einnahmen können nicht mehr durch die Maluszahlungen gedeckt werden, da diese die festgelegte Obergrenze von 8000 Euro pro Fahrzeug im Jahr 2029 erreichen. Um die Bonuszahlungen finanzieren zu können, werden Unterstützungszahlungen aus den Ökosteuer-einnahmen bis zur maximalen Obergrenze notwendig, weshalb die Steuersätze stärker angehoben werden müssen. Wird auch dort die Obergrenze erreicht, so ist die Grundvoraussetzung der Aufkommensneutralität des Haushalts nicht mehr gewährleistet.

Current Cash Balance [Euro]

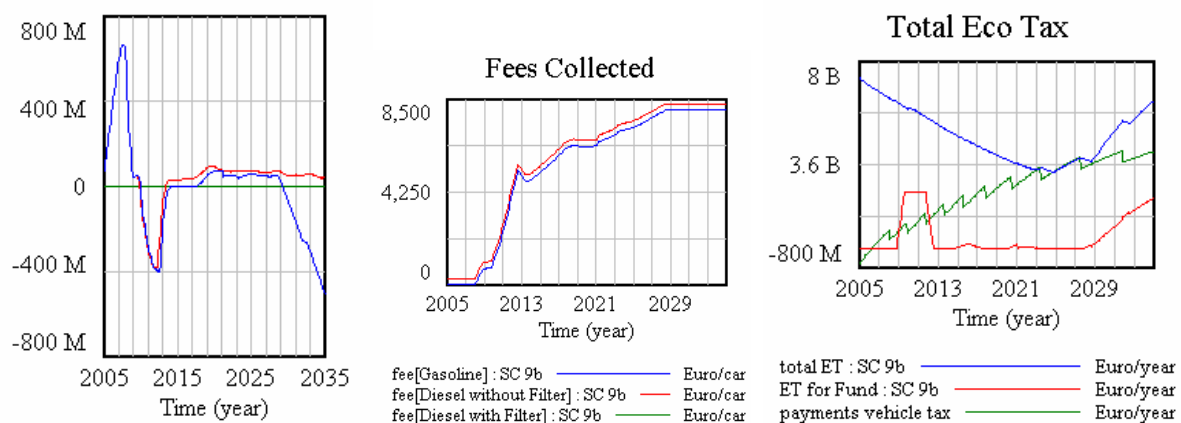


Abbildung 6-30: Haushaltsentwicklung bei einer Fördersumme von 8 Milliarden EUR

Der Einsatz des ökonomischen Instrumentes der aufkommensneutralen Bonus- und Maluszahlungen ist mit einer Gesamtfördersumme von 7 Milliarden Euro bis zum Jahr 2035 möglich. Wie die Ergebnisse zeigen, ist dies ein sehr geeignetes Instrument, um die Emissionsziele durch Förderung alternativer Antriebsentwicklungen zu erreichen.

6.3.4 Szenario 10: Wirkung der Verschrottungsprämien

Dieses Szenario entspricht dem Szenario 9 erweitert um das Instrument der Zahlung einer Verschrottungsprämie für alte Fahrzeuge. Die Höhe dieser Prämie wird auf 700 Euro pro Fahrzeug festgelegt. Die Reduktion des gesamten Fahrzeugbestandes als Folge dieses ökonomischen Instrumentes ist in Abbildung 6-31 dargestellt.

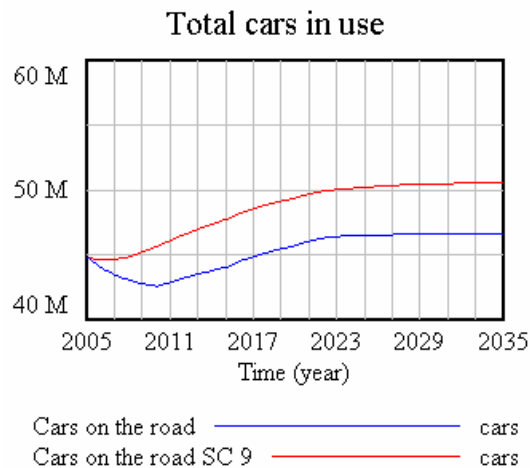


Abbildung 6-31: Gesamtfahrzeugbestand mit und ohne Zahlung einer Verschrottungsprämie

Die Senkung der Emissionen, die in Abbildung 6-32 dargestellt sind, läßt sich nicht nur auf die Verjüngung des durchschnittlichen Fahrzeugalters, sondern vor allem auf die Senkung des gesamten Fahrzeugbestandes zurückführen, da eine wesentliche Veränderung der Marktanteile nicht erkennbar ist. Daher ist eine exakte Beurteilung der Wirksamkeit dieses Instrumentes im Vergleich zu den anderen Szenarien nicht möglich, denn die Grundmenge der Emittenten ist unterschiedlich.

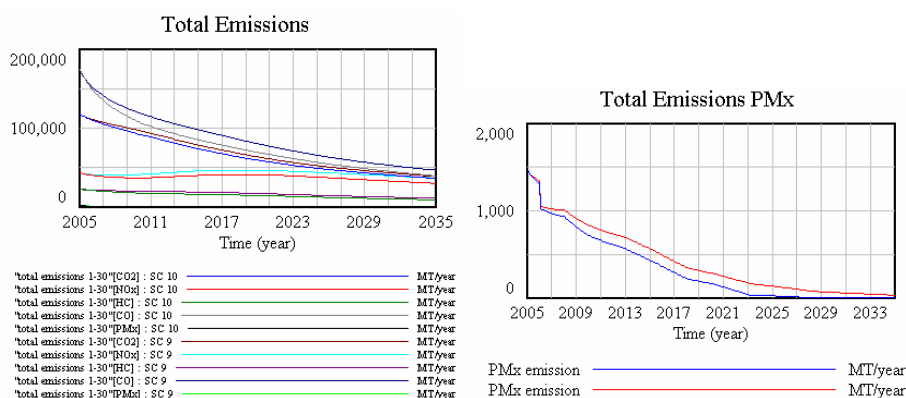


Abbildung 6-32: Emissionsentwicklung mit und ohne Zahlung einer Verschrottungsprämie

Die in Abbildung 6-33 dargestellte Haushaltsentwicklung zeigt, daß eine Verschrottungsprämie in Höhe von 700 Euro finanzierbar ist, da die maximale Obergrenze der Maluszahlen pro Fahrzeug nicht erreicht wird.

Current Cash Balance [Euro]

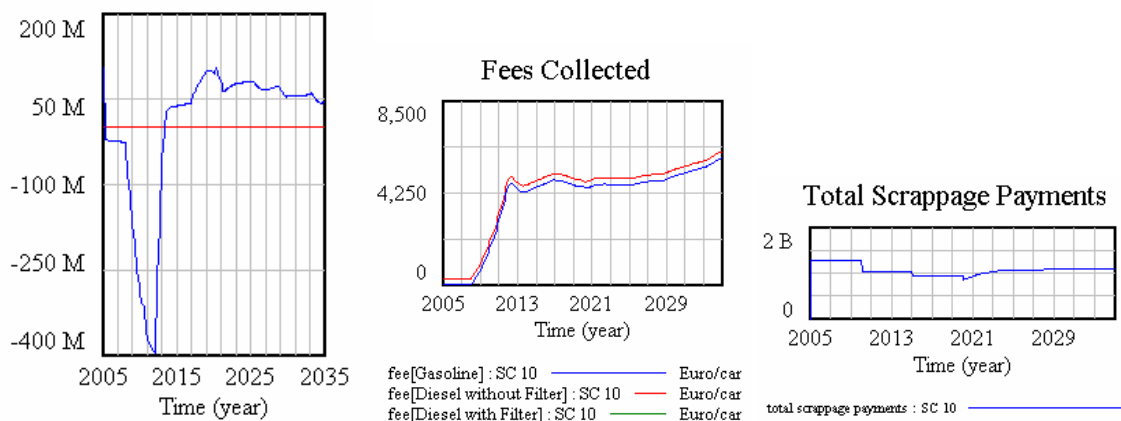


Abbildung 6-33: Haushaltsentwicklung mit und ohne Zahlung einer Verschrottungsprämie

Obwohl nicht direkt vergleichbar, wirkt die Zahlung einer Verschrottungsprämie auf eine Emissionsminderung hin, indem der Gesamtfahrzeugbestand vermindert werden kann. Dies geschieht jedoch zu Lasten der Mobilität der Bevölkerung oder könnte zu einer Steigerung der spezifischen Fahrleistung führen.

6.3.5 Szenario 11: Optimale Lenkungswirkung

Dieses Szenario geht von den gleichen Rahmenbedingungen wie Szenario 9 aus. Eine Verschrottungsprämie wird nicht gezahlt. Die Höhe der gesamten Fördersumme wird jedoch nicht als Zielgröße der Steuerung festgelegt, sondern es soll eine optimale Lenkungswirkung durch den Einsatz der Bonus- und Maluszahlen auf die Kaufpreise erreicht werden, sofern es die Grenzen der Zahlungen pro Fahrzeug erlauben. Die Steuerung dieser Simulation wird mit dem Autopiloten-Modell ‚Ropt‘ durchgeführt. In Abbildung 6-34 ist der Verlauf der Bonus- und Maluszahlen für jeden Fahrzeugtyp dargestellt. Dabei sind die Bonuszahlungen so gewählt, daß der Kaufpreis eines Fahrzeuges nach Möglichkeit 30.000 Euro beträgt.

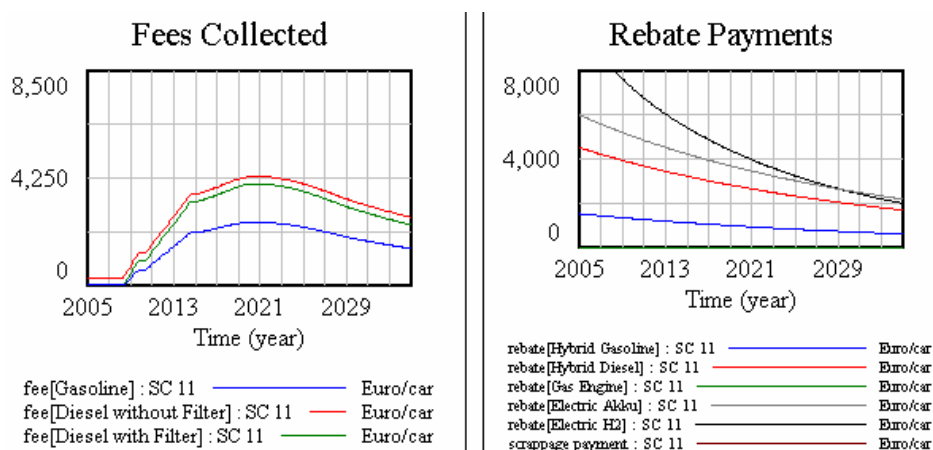


Abbildung 6-34: Höhe der Bonus- und Maluszahlen bei optimaler Lenkungswirkung

Da der Kaufpreis für ein Erdgasfahrzeug weniger als 30.000 Euro beträgt, wird für diesen Fahrzeugtyp kein Bonus ausgezahlt. Oberste Priorität hat nach wie vor die Aufkommensneutralität des Haushaltes. Die Maluszahlungen orientieren sich an diesem Ziel, werden aber nicht homogen auf die Fahrzeugtypen aufgeteilt, sondern orientieren sich an deren Kaufpreis, wie in Abschnitt 5.4.12.3 beschrieben. Wie in Abbildung 6-35 ersichtlich, stellt die Finanzierbarkeit kein Hindernis dar, da die gesamte Summe der Förderzahlungen immer unterhalb derjenigen in Szenario 9 bleibt, welche die Grenze der Finanzierbarkeit darstellt.

Current Cash Balance [Euro]

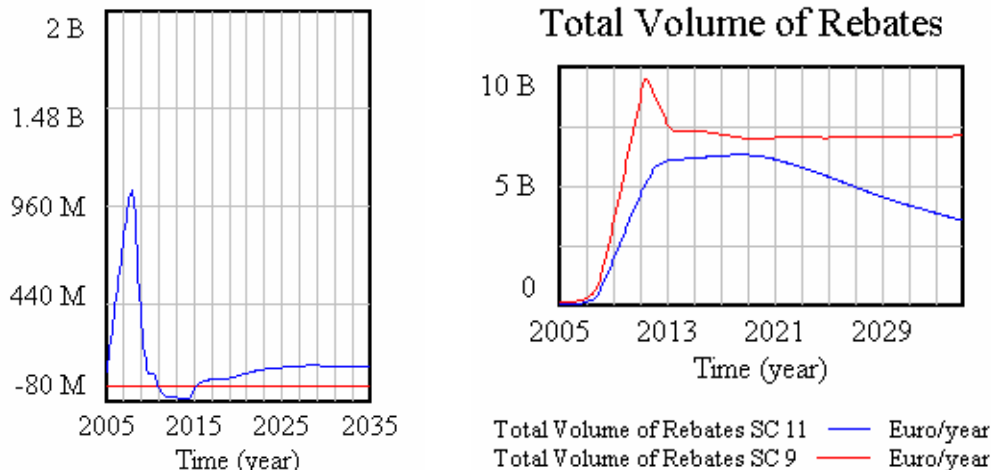


Abbildung 6-35: Haushaltsentwicklung bei optimaler Lenkungswirkung

Da die Fördersumme in der zweiten Hälfte des Simulationszeitraumes stetig sinkt, kann die Ausführung dieser Politik auch nach 2035 fortgeführt werden, bis alle Fahrzeugtypen einen durchschnittlichen Kaufpreis von 30.000 Euro erreichen.

Die Entwicklung der Neuverkäufe in Abbildung 6-36 erreicht bei den konventionellen und den Hybridfahrzeugen mit Ottomotor ab dem Jahr 2013 ein konstantes Niveau, bei den Dieselfahrzeugen wird ein konstantes Niveau im Jahr 2023 erreicht. Die Neuverkäufe von Dieselhybridfahrzeugen weisen ab 2013 eine stetig fallende Tendenz auf. Die Neuverkäufe der Brennstoffzellenfahrzeuge steigen im gesamten Simulationszeitraum stetig an, wobei sich ab dem Jahr 2023 eine verringerte Wachstumsrate einstellt. Nach einem Anstieg stabilisieren sich die Verkaufszahlen der Erdgasfahrzeuge im Jahr 2025.

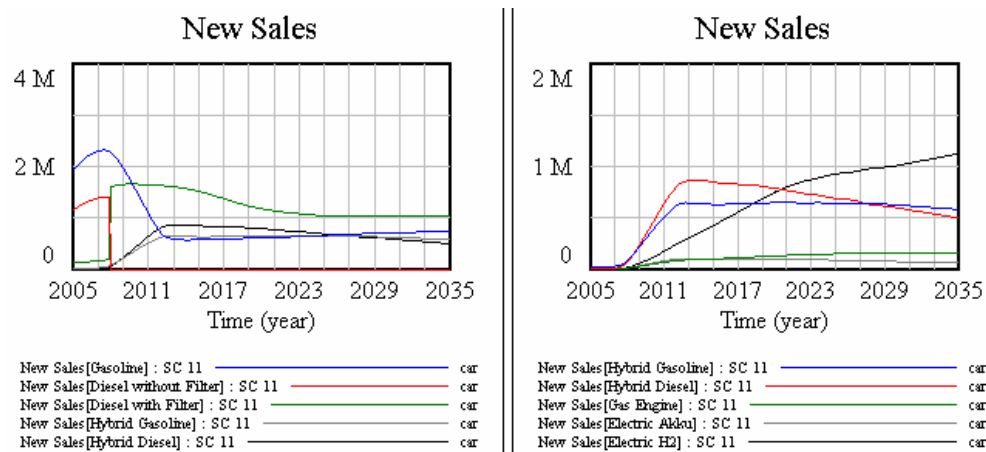


Abbildung 6-36: Entwicklung der Neuverkäufe bei optimaler Lenkungswirkung

Hieraus ergibt sich der in Abbildung 6-37 dargestellte Verlauf der Fahrzeugbestände. Im Vergleich zu Szenario 9 verlaufen die Bestände für konventionelle Dieselfahrzeuge auf niedrigerem Niveau, während die Bestände der Hybridfahrzeuge mit Dieselmotor auf höherem Niveau verlaufen. Der Marktanteil der Hybridfahrzeuge mit Ottomotor hat sich deutlich verringert und liegt nun unter dem Niveau der Dieselhybridfahrzeuge. Der Bestandsverlauf für konventionelle Ottomotorfahrzeuge liegt etwas über dem in Szenario 9. Der Bestand der Brennstoffzellenfahrzeuge im Jahr 2035 ist mit 11,13 Millionen Fahrzeugen höher als bei allen anderen Szenarien, der Bestand an Erdgasfahrzeugen beträgt mit 1,8 Millionen Fahrzeugen ein wenig mehr als die Hälfte im Vergleich des Bestandes in Szenario 9.

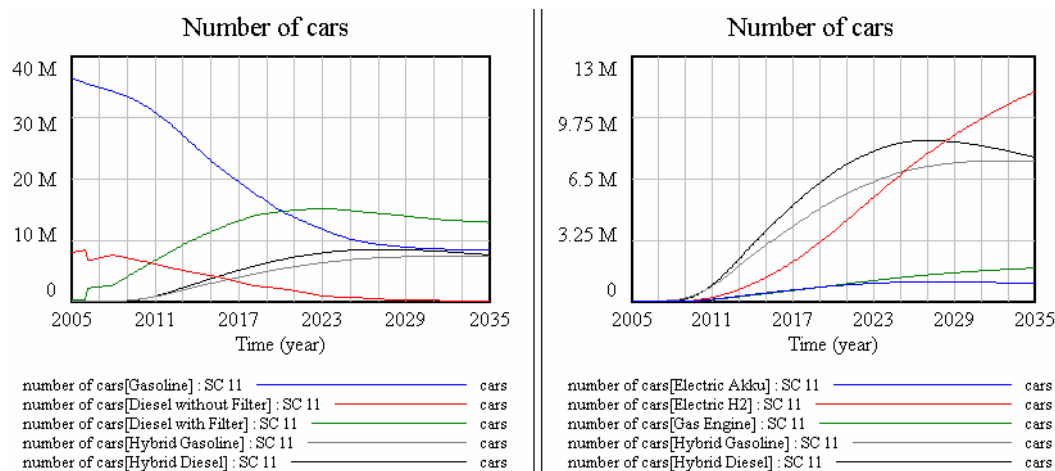


Abbildung 6-37: Verlauf der Fahrzeugbestände bei optimaler Lenkungswirkung

Der Vergleich der Emissionen zeigt, daß die Emissionswerte für CO₂, HC und CO gegenüber Szenario 9 nochmals reduziert werden können (siehe Abbildung 6-38). Bei den Partikelemissionen werden keine nennenswerten Verbesserungen erzielt, während die NO_x-Emissionen über dem Verlauf in Szenario 9 liegen.

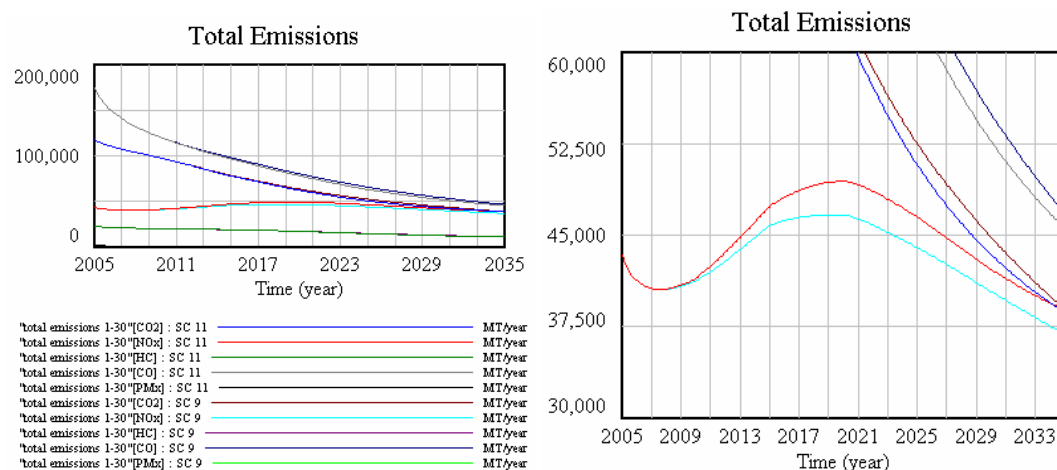


Abbildung 6-38: Emissionsentwicklung bei optimaler Lenkungswirkung

Der Einsatz des ökonomischen Instrumentes der Bonus- und Maluszahlungen unter Berücksichtigung der optimalen Lenkungswirkung stellt den wirksamsten Weg zum Erreichen der meisten Emissionsziele durch Förderung alternativer Antriebsstrategien dar. Dies ist umso beachtlicher, da das Gesamtvolumen der Fördermittel geringer ist als bei der homogenen Bonus- und Maluszahlung, wie in Abbildung 6-39 dargestellt ist.

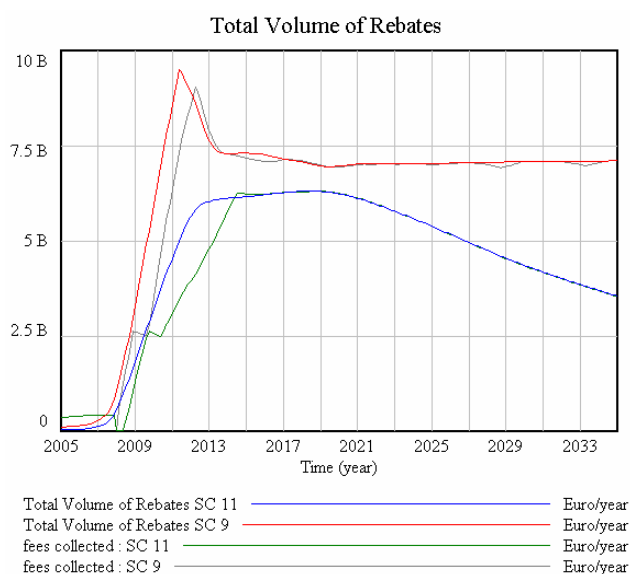


Abbildung 6-39: Vergleich der gesamten Fördermittel und der gesamten Einnahmen aus den Maluszahlungen zur Finanzierung für die Szenarien 9 und 11

Abschließend wird in dieser Abbildung noch der Verlauf der Gesamteinnahmen aus den Maluszahlungen im Vergleich zu den Gesamtauszahlungen der Rabatte vorgestellt, wobei das Nachlaufen der Maluseinnahmen aufgrund des Informationsmangels bei der Synchronisation gut zu erkennen ist.

In Abschnitt 6.6 werden die obenstehenden Ergebnisse der Szenarien im deutschen Modell einzeln gegenübergestellt und ausgewertet. Doch zunächst werden in Abschnitt 6.4 und 6.5 die Szenarien im japanischen Modell erläutert.

6.4 Übersicht der Szenarien im Modell Japan

Die japanische Regierung versucht insbesondere mit dem unter Kapitel 3 vorgestellten ‚Green Tax System‘ die Marktanteile der Neuzulassungen zu beeinflussen und damit langfristig die Zusammensetzung des Fahrzeugbestandes hin zu umweltfreundlichen Fahrzeugen (Low Emission Vehicles, LEV) zu verändern. Mit Hilfe des Japan-Modells sollen die Auswirkungen des ‚Green Tax System‘ und einer flankierenden Ökosteuer analysiert werden.

Hierzu werden zunächst ein statisches und ein dynamisches Referenzszenario entwickelt, mit deren Hilfe die durch die politischen Instrumente veränderten Werte der betrachteten Größen verglichen werden können. Die Referenzszenarien beginnen im Jahr 2001 mit der Einführung des ‚Green Tax System‘. Im statischen Referenzszenario bleiben die Fahrzeugattribute im Zeitverlauf konstant, während sie im dynamischen Referenzszenario der in Abschnitt 5.8.2 beschriebenen Entwicklung unterliegen. Die ersten Jahre geben die Situation der Referenzdaten wider. Die Szenarien im Japan-Modell enden im Jahr 2030.

Tabelle 6-2: Übersichtstabelle der untersuchten Szenarien im japanischen Modell

Scenario	1	2	3	4	5
Model	konstante Parameter	Technischer Fortschritt	Verschärfung 'Green Tax'	Verbrauchssteuern	Instrumentenkombination
U1: price development	off	on	on	on	on
U2: fuel consumption d.	off	on	on	on	on
U3: range development	off	on	on	on	on
U4: emission fraction d.	off	on	on	on	on
U5: fuel availability d.	off	on	on	on	on
U6: horsepower d.	off	on	on	on	on
New Feebate System	off	off	on	on	on
Eco -Tax	off	off	off	on	on
Combination of Measures	off	off	off	off	on

Im Anschluß an die Entwicklung der Referenzszenarien wird die Wirkung von umweltpolitischen Instrumenten auf das Systemverhalten untersucht. In dem Szenario ‚Verschärfung des Green Tax System‘ sollen die Auswirkungen der ab 2004 geltenden ersten Verschärfung des ‚Green Tax System‘ analysiert werden (siehe Abschnitt 3.3.4.4 und Tabelle 3-4). Im Hinblick auf die Verpflichtungen für den japanischen Staat aus dem Kyoto-Protokoll simuliert ‚Green Tax System mit Ökosteuer‘ die Einführung einer Verbrauchssteuer. Das ‚Zukunftsszenario‘ analysiert die Kombination aus Verschärfung des ‚Green Tax System‘ und der schrittweisen Erhöhung der Ökosteuer.

Wie in Deutschland beabsichtigt der japanische Gesetzgeber die Emissionen signifikant zu mindern, ohne dafür hohe zusätzliche Belastungen des Staatshaushaltes aufwenden zu müssen. Auch im Japan-Modell soll die Mobilität der Bürger nicht eingeschränkt werden, so daß auch hier der Instrumenteneinsatz keinen Einfluß auf die Entwicklung des Gesamtfahrzeugbestandes haben soll. Auf diese Weise können die erreichten Emissionsreduktionen und Haushaltsentwicklungen untereinander verglichen werden.

Das Mittel zum Erreichen des Umweltziels sind das japanische ‚Green Tax System‘ als Bonussystem und eine Verbrauchssteuer. Die zu untersuchenden Zielgrößen sind die Verkaufszahlen beziehungsweise die Neuzulassungen, die Marktanteile der Fahrzeugtypen am Be-

stand, die durch den Fahrzeugbestand im Zeitverlauf verursachten Emissionen sowie die Auswirkungen auf die Ausgaben für Steueranreize.

6.4.1 Szenario 1 mit konstanten Parametern (Anfangsszenario)

Als Referenzszenario soll die Situation zu Beginn der Simulation im Jahr 2001 abgebildet werden. Dabei werden die Auswirkungen des zu diesem Zeitpunkt eingeführten „Green Tax Systems“ untersucht. Alle Parameter bleiben im Zeitverlauf konstant. Somit werden die im vorigen Kapitel ermittelten Anfangswerte beibehalten. Es erfolgt keine Verschärfung des Anreizsystems. Die einzelnen Fahrzeugtypen erhalten entsprechend Tabelle 3 Rabatte auf den Kaufpreis. Eine Ökosteuer auf die Kraftstoffe wird nicht erhoben.

Bei den Neuzulassungen ist ein deutlicher Trend hin zu umweltfreundlichen Fahrzeugen zu erkennen (siehe Abbildung 6-40). Bereits nach drei Jahren werden kaum noch ‚Gasoline 0‘-Fahrzeuge verkauft. Aber auch die Absatzzahlen der ‚One Star Low Emission Vehicles‘ gehen innerhalb kürzester Zeit erheblich zurück. Dagegen steigen die Verkaufszahlen der 2-Sterne und besonders der 3-Sterne Fahrzeuge deutlich an.

Von den „herkömmlichen“ Benzinfahrzeugen werden nach vier Jahren nur noch etwa 5000 Fahrzeuge jährlich verkauft. Für diesen deutlichen Rückgang gibt es im Wesentlichen zwei Gründe. Zum einen erhalten die ‚Gasoline 0‘-Fahrzeuge keine Vergünstigungen auf die Automobilsteuer, zum anderen erzeugen sie wesentlich höhere Stickoxidemissionen als die übrigen Fahrzeugtypen. Da diese beiden Eigenschaften in der Rangfolge der Fahrzeugattribute auf den ersten beiden Rängen stehen, beeinflussen sie die Kaufentscheidung dementsprechend stark. Daß ab dem Jahr 2004 kaum noch ‚herkömmliche‘ Benzinfahrzeuge abgesetzt werden, wird durch die Referenzdaten belegt und erklärt sich auch durch einen Angebotswechsel der Automobilhersteller. Man kann davon ausgehen, daß die ‚Gasoline 0‘-Fahrzeuge mit der Einführung des ‚Green Tax Systems‘ in absehbarer Zeit nicht mehr angeboten werden.

Der Anstieg der Verkaufszahlen bei den 2- und 3-Sterne Fahrzeugen ist im Wesentlichen auf die Steuervergünstigungen und die niedrigeren Stickoxidemissionen zurückzuführen.

Bei der Betrachtung der alternativen Antriebstechnologien (‚Electric, Hybrid, CNG‘) spiegelt sich ebenfalls der Trend zu umweltfreundlichen Fahrzeugen wider. Im Jahr 2010 werden siebenmal so viele Hybridfahrzeuge verkauft wie im Jahr 2001. Auch die jährlichen Absatzzahlen der Erdgas- und Elektrofahrzeuge steigen leicht an. Dieser Anstieg kann im wesentlichen auf die Umweltfreundlichkeit sowie auf die Steuervergünstigungen zurückgeführt werden, da alle drei Fahrzeugtypen als ‚Ultra Low Emission Vehicles‘ sowohl auf die Automobilsteuer als auch auf die Anschaffungssteuer einen Nachlaß erhalten. Die Hybridfahrzeuge zeichnen sich zudem durch eine sehr große Reichweite aus.

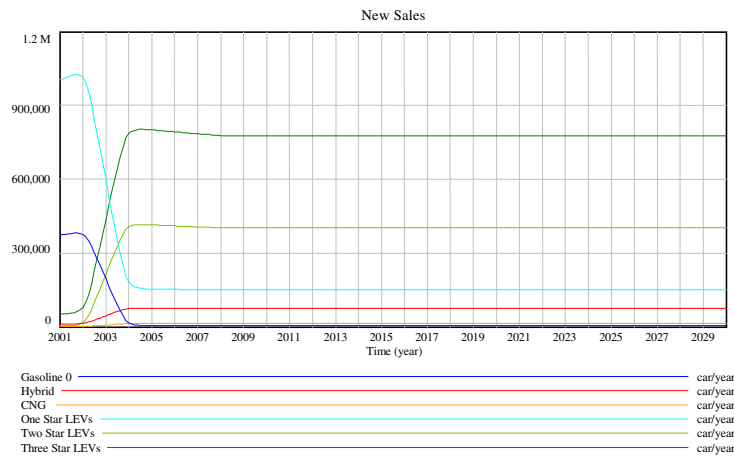


Abbildung 6-40: Statisches Referenzszenario: Absatzzahlen nach Fahrzeugtypen¹⁶⁵

In dem Zeitraum von 2005 bis 2008 ist ein leichter Rückgang der Verkaufszahlen aller Fahrzeugtypen zu erkennen. Dieser ist auf die in Abschnitt 5.5.5 beschriebene abnehmende ‚growth fraction‘ zurückzuführen.

Bezüglich der Fahrzeuggröße kann man einen Trend in Richtung der ‚Small Vehicles‘ erkennen (siehe Abbildung 6-41). Auch die Verkaufszahlen der ‚Medium Low Emission Vehicles‘ steigen mit der Einführung des ‚Green Tax Systems‘ an. Dieser Trend läßt sich durch die niedrigeren Kaufpreise und den geringeren Kraftstoffverbrauch erklären. Durch die bessere Kraftstoffeffizienz sinken zudem die Kraftstoffkosten pro Kilometer. Der Trend zu kleineren Fahrzeugen ist auch bei den Referenzdaten zu erkennen und wird durch eine Studie der Hiroshima Universität belegt [Fujiwara o. J., S. 6].

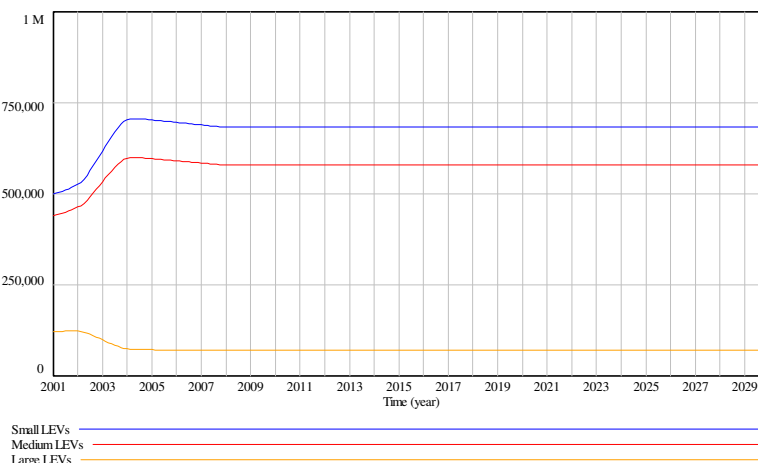


Abbildung 6-41: Statisches Referenzszenario: Absatzzahlen nach Fahrzeuggröße

Der Fahrzeugbestand sinkt von anfänglich 18,46 Millionen Fahrzeugen auf rund 10,9 Millionen PKW im Jahr 2030. Der Grund dafür sind die abnehmenden Zulassungszahlen sowie die hohen Löschungsraten. Die Entwicklung des Fahrzeugbestandes (Abbildung 6-42) erfolgt

¹⁶⁵ Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden nicht alle Fahrzeugtypen dargestellt.

ähnlich wie die der Neuzulassungen aus Abbildung 6-40, jedoch mit einer erheblichen Zeitverzögerung. Wie in Abschnitt 5.5.4 beschrieben, setzt sich der Anfangsbestand nur aus ‚herkömmlichen Benzinfahrzeugen‘ zusammen. Der Marktanteil der ‚Gasoline 0‘-Fahrzeuge nimmt kontinuierlich ab. Im Jahr 2013 sind diese Fahrzeuge fast vollständig durch die LEVs und ‚Clean Energy Cars‘ vom Markt verdrängt worden. Während die Marktanteile der ‚Small‘ und ‚Medium One Star LEVs‘ zunächst steigen, nehmen sie ab 2006 wieder ab. Dagegen wachsen die Anteile der übrigen Fahrzeugtypen am Bestand ab 2003 kontinuierlich an, bis sie sich ab dem Jahr 2013 auf einen konstanten Wert einpendeln. Der Marktanteil der Hybridfahrzeuge ist bis 2013 auf 5 Prozent angewachsen. Zu diesem Zeitpunkt besteht der Fahrzeugbestand zu mehr als der Hälfte (52 Prozent) aus ‚Ultra Low Emission Vehicles‘.

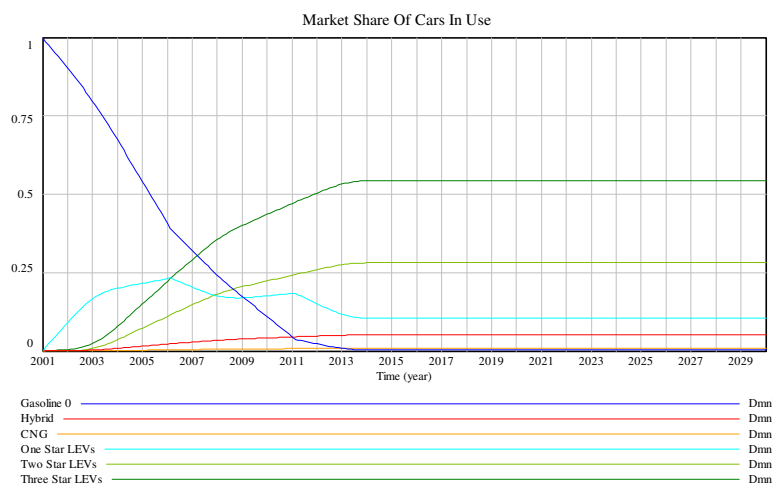


Abbildung 6-42: Statisches Referenzszenario: Marktanteile des Fahrzeugbestandes

Die Emissionen des Fahrzeugbestandes werden skaliert, um sie in *einer* Graphik sichtbar zu machen. Die Angaben zu den Luftschadstoffen HC, NO_x und PM_x werden dazu mit dem Faktor 1000 multipliziert, die Daten der CO-Emissionen mit 100. Damit sind die tatsächlichen Mengen nicht wie im Diagramm ausgezeichnet MT pro Jahr, sondern müssen durch 1000 bzw. durch 100 dividiert werden. Dies gilt im Folgenden für alle Emissionsberechnungen im japanischen Modell.

Abbildung 6-43 zeigt einen Einbruch der Emissionen nach dem ersten Jahr. Dieser Effekt ist modelltechnisch bedingt und beruht auf der Tatsache, daß bereits im ersten Jahr die innerhalb der ersten fünf Jahre zu löschenden Fahrzeuge aus dem Bestand entfernt werden. Die Emissionen von CO₂, HC und NO_x sind bis zum Jahr 2014 rückläufig und bleiben dann bis zum Ende der Simulation auf einem konstanten Niveau. Die Abnahme dieser Emissionen begründet sich durch den Wechsel von ‚herkömmlichen‘ Benzinfahrzeugen zu ‚Low Emission Vehicles‘ sowie durch den sinkenden Fahrzeugbestand. Ab dem Zeitpunkt, an dem die ‚Gasoline 0‘-Fahrzeuge aus dem Fahrzeugbestand verdrängt sind und die Marktanteile der übrigen Fahrzeugtypen nicht mehr variieren (Abbildung 6-42), bleiben die Emissionen auf einem konstanten Niveau. Die in Abbildung 6-43 zu erkennenden HC-Emissionen verlaufen aufgrund des

gleich hohen Abgasgrenzwertes annähernd analog zu den NO_x -Emissionen. Bei den Kohlenstoffmonoxidemissionen kann bis auf die modelltechnisch bedingte Abnahme kein Rückgang der Emissionen beobachtet werden. Diese Entwicklung ist auf den für alle Benzinfahrzeuge einheitlichen Abgasgrenzwert für CO zurückzuführen. Die Partikelemissionen sind bei der Betrachtung der Personenkraftwagen von untergeordneter Bedeutung, da der Marktanteil der Dieselfahrzeuge am Bestand auch im Zeitverlauf deutlich unter einem Prozent liegt.

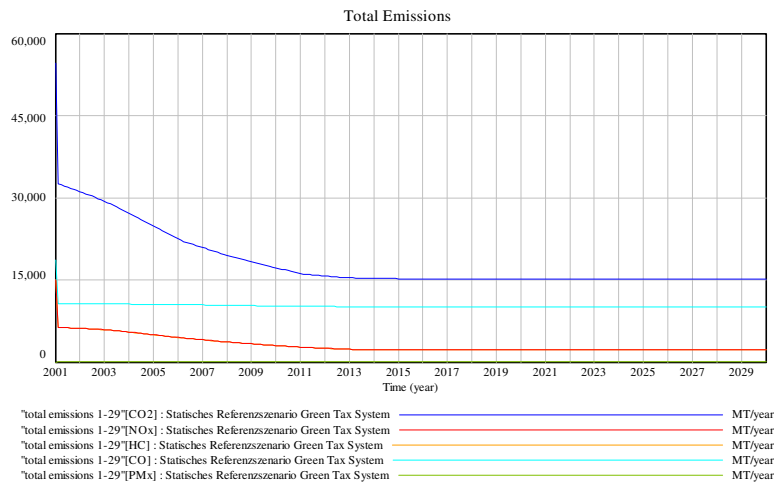


Abbildung 6-43: Statisches Referenzszenario: Emissionen des Fahrzeugbestandes

In der Realität zeigt sich, daß das von der japanischen Regierung geplante Budget zur Verbreitung der ‚Low Emission Vehicles‘ in Höhe von 20 Billionen Yen nicht ausreicht, um die Steuerermäßigungen für die umweltfreundlichen Fahrzeuge zu finanzieren. Abbildung 6-44 zeigt die Ausgaben für Rabatte bezogen auf die ‚Toyota-Fahrzeugflotte‘. Die Ausgaben für die Steuerermäßigungen steigen bis 2004 exponentiell an. Anschließend gehen sie leicht zurück und verbleiben ab 2008 auf einem konstanten Niveau oberhalb von 45 Billionen Yen (etwa 333 Millionen Euro) pro Jahr. Der Verlauf der Ausgaben gleicht dem der Wachstumsfunktion für die Neuzulassungen. Die hohen Ausgaben für die Steuerermäßigungen waren ein Grund für den Beschluß der japanischen Regierung, das ‚Green Tax System‘ zum 1. April 2004 zu verschärfen [VTT 2003c, S. 1ff.].

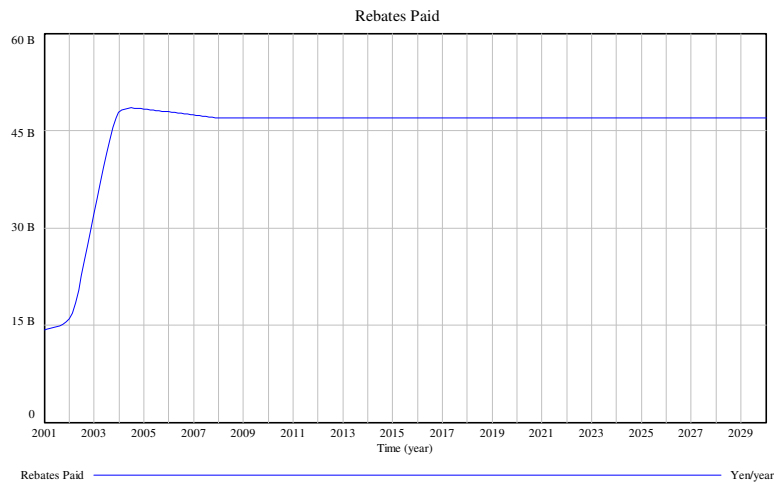


Abbildung 6-44: Statisches Referenzszenario: Ausgaben für Steuerermäßigungen

Das statische Referenzszenario mit der Einführung des ‚Green Tax Systems‘ im Jahr 2001 zeigt einen deutlichen Trend zum Kauf umweltfreundlicher Fahrzeuge. Dabei werden besonders die 2- und 3-Sterne Fahrzeuge bevorzugt. Damit wird das Ziel der Verbreitung von ‚Low Emission Vehicles‘ erreicht. Bei den alternativen Antriebstechnologien gelingt lediglich den Hybridfahrzeugen eine Marktdurchdringung. Die Simulationsergebnisse lassen zudem einen Trend zu kleineren Fahrzeugen erkennen. Mit der Verbreitung der ‚Low Emission Vehicles‘ gelingt es der japanischen Regierung die Emissionen zunächst deutlich zu senken, nach einem ersten Rückgang können keine weiteren Emissionsreduzierungen beobachtet werden. Die Ausgaben für die Steuerermäßigungen steigen innerhalb kürzester Zeit deutlich über das zur Verfügung stehende Budget und verbleiben ab 2008 auf einem konstanten Niveau oberhalb von 45 Billionen Yen pro Jahr (333 Millionen Euro).

6.4.2 Szenario 2 mit nichtlinearer Angleichung der Fahrzeugattribute

Im Folgenden soll eine nichtlineare Anpassung der verschiedenen Fahrzeugattribute im Zeitverlauf analysiert werden. Damit sollen künftige Forschungs- und Entwicklungsprozesse berücksichtigt werden, die zum einen eine Marktdurchdringung der neuen Technologien ermöglichen und zum anderen die Fahrzeugattribute der herkömmlichen Antriebsvarianten weiter verbessern. Für die Simulation wird eine bestimmte Entwicklungsrate geschätzt, mit der sich die Attribute verändern. Das Referenzszenario wird durch den Zusatz ‚dynamisch‘ beschrieben. Es erfolgt wiederum keine Verschärfung des ‚Green Tax Systems‘.

Bei den Neuzulassungen ist bis zum Jahr 2008 ein analoger Verlauf zum statischen Referenzszenario zu erkennen (Abbildung 6-45). Ab 2008 sinken die Absatzzahlen der ‚Low Emission Vehicles‘ jedoch weiter, während die Zulassungszahlen der Erdgas- und Elektrofahrzeuge (‚Clean Energy Cars‘) ab diesem Zeitpunkt deutlich zunehmen. Die Attribute ‚Fahrzeugpreis‘, ‚Motorleistung‘, ‚Kraftstoffverfügbarkeit‘ und ‚Reichweite‘, die zunächst eine Marktdurchdringung verhindern, können durch technologische Weiterentwicklungen im Zeitverlauf ver-

bessert werden und gleichen sich langsam an die Werte der herkömmlichen Antriebsvarianten Benzin und Diesel an. Damit stellen die Erdgas- und Elektrofahrzeuge (Entwicklung serienreifer Brennstoffzellenfahrzeuge) in Zukunft eine gleichwertige Alternative zu den umweltfreundlichen konventionellen Fahrzeugen dar.

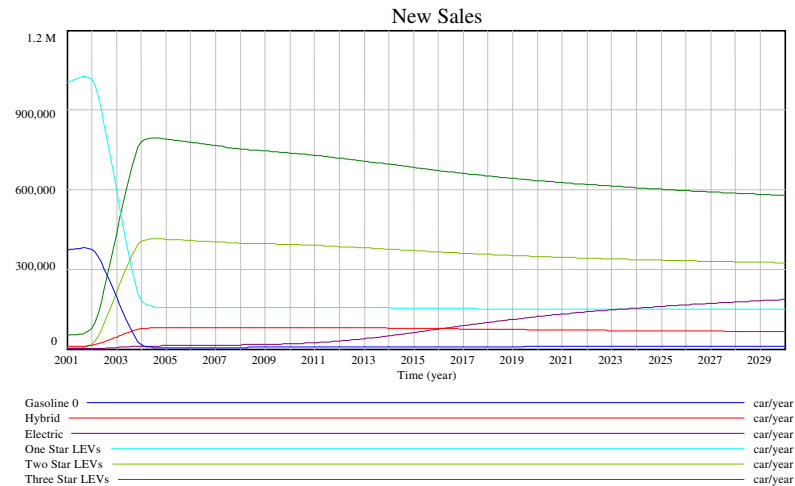


Abbildung 6-45: Dynamisches Referenzszenario: Absatzzahlen nach Fahrzeugtypen

Die Veränderung der Neuzulassungen wirkt sich zeitverzögert und etwas gedämpft auch auf die Marktanteile der Fahrzeugtypen am Bestand aus (Abbildung 6-46). Die Kurvenverläufe fallen wesentlich flacher aus, zeigen aber qualitativ das gleiche Verhalten wie die Graphen der Neuzulassungen. Die ‚Clean Energy Cars‘ besitzen am Ende der Simulation einen Marktanteil von fast 20 Prozent am Fahrzeugbestand.

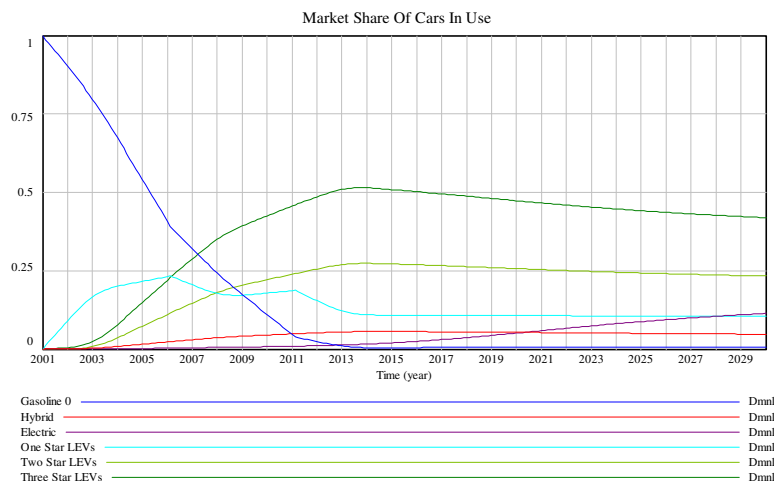


Abbildung 6-46: Dynamisches Referenzszenario: Marktanteile des Fahrzeugbestandes

Im Vergleich zum statischen Referenzszenario zeigen die Emissionen im nichtlinearen Fall einen kontinuierlich sinkenden Verlauf bis zum Jahr 2030 (Abbildung 6-47). Aufgrund der Marktdurchdringung der ‚Clean Energy Cars‘ können die Emissionen auch nach 2014 weiter reduziert werden. Einen besonders großen Anteil an dieser Entwicklung haben die Elektrofahrzeuge, die im Betrieb keine Emissionen verursachen. Im dynamischen Referenzszenario

wird zudem eine Verbesserung der Umweltfreundlichkeit der herkömmlichen Fahrzeugtypen durch technologische Weiterentwicklungen und strengere Abgasnormen berücksichtigt. Damit läßt sich auch der deutlichere Rückgang der Emissionen im Vergleich zum statischen Szenario erklären. Die Kohlenstoffdioxidabgase können im nichtlinearen Fall besonders stark reduziert werden. Bei diesem Szenario kann auch eine Minderung von Kohlenstoffmonoxid beobachtet werden.

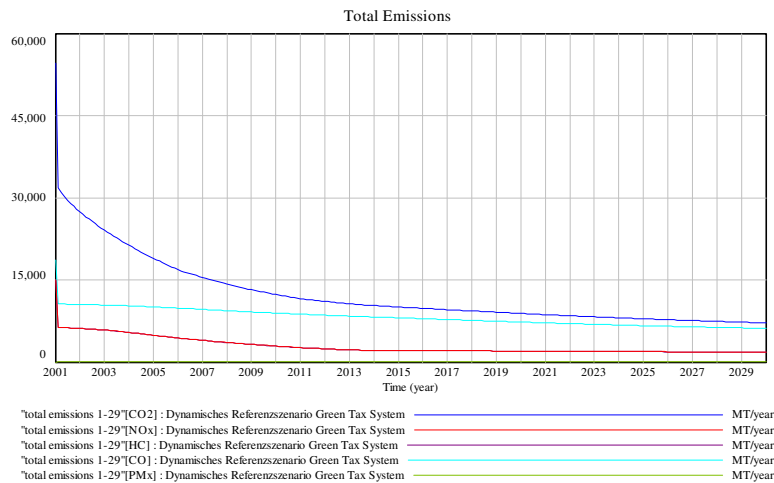


Abbildung 6-47: Dynamisches Referenzszenario: Emissionen des Fahrzeugbestandes

Die Ausgaben für die Steuerermäßigungen verlaufen im dynamischen Referenzszenario bis zum Jahr 2008 analog zum statischen Szenario (Abbildung 39). Anschließend bleiben sie jedoch nicht konstant, sondern steigen bis zum Jahr 2030 auf über 60 Billionen Yen (etwa 444 Millionen Euro) pro Jahr an. Der Grund für diesen Anstieg sind die höheren Ermäßigungen für Erdgas- und Elektrofahrzeuge, die als ‚Ultra Low Emission Vehicles‘ eingestuft sind. Wie bereits oben erläutert, waren die enormen Ausgaben für die Steuererleichterungen ein Grund für die Verschärfung des ‚Green Tax Systems‘.

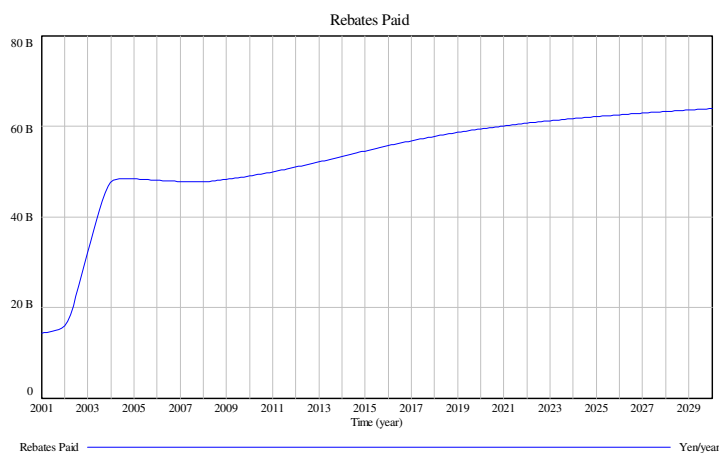


Abbildung 6-48: Dynamisches Referenzszenario: Ausgaben für Steuerermäßigungen

Im dynamischen Referenzszenario ergeben sich bis zum Jahr 2007 analoge Simulationsergebnisse zum statischen Referenzszenario. Ab diesem Zeitpunkt steigen die Absatzzahlen der

Erdgas- und Elektrofahrzeuge – aufgrund der simulierten Verbesserungen der Fahrzeugattribute – an. Diese Entwicklung läßt sich zeitverzögert auch bei den Marktanteilen am Fahrzeugbestand erkennen. Dadurch gelingt es, die Emissionen bis zum Ende der Simulation deutlich zu reduzieren. Die Ausgaben für die steuerliche Förderung der umweltfreundlichen Fahrzeuge steigen durch die erhöhten Absatzzahlen der Erdgas- und Elektrofahrzeuge jedoch deutlich an.

6.5 Analyse der Wirkung weiterer umweltpolitischer Instrumente

In diesem Abschnitt wird zunächst die im Jahr 2004 eingeführte Verschärfung des ‚Green Tax Systems (GTS)‘ untersucht (siehe Abschnitt 5.8.7.1). Anschließend wird die Einführung einer Ökosteuer auf Kraftstoffe analysiert (siehe Abschnitt 5.8.7.2). Zum Abschluß soll ein Szenario mit beiden Instrumenten abgebildet werden (siehe Abschnitt 5.8.7.3).

6.5.1 Verschärfung des ‚Green Tax Systems‘ in 2004

Bei den Absatzzahlen können durch die Verschärfung des Steueranreizsystems keine Veränderungen im Vergleich zum Referenzszenario beobachtet werden (siehe Abbildung 6-49). Eine genaue Betrachtung der Absatzzahlen zeigt einen minimalen Rückgang der Verkaufszahlen der betroffenen Fahrzeugtypen. Aus diesem Grund können auch keine signifikanten Steigerungen bei den Neuzulassungen der alternativen Antriebe erzielt werden.

Die Ursache für die geringen Veränderungen der Absatzzahlen ist die modellhafte Gleichsetzung der Steuerermäßigung in 2004 mit einer Kaufpreisminderung. Da die absoluten Vergünstigungen im Vergleich zum Kaufpreis relativ gering sind, wird ihre Wirkung abgeschwächt. Die modellhaften Steuervergünstigungen werden als Einmalbetrag betrachtet und nicht als Reduzierung laufender Kosten. Letzteres würde eventuell zu einem anderen Kaufverhalten führen, wenn der Käufer weiß, daß er zwar einen einmalig höheren Kaufpreis für umweltfreundliche Technologien zu entrichten hat, dafür aber seine jährlichen laufenden Kosten geringer ausfallen. Mit der Verschärfung des ‚Green Tax Systems‘ kann keine Marktdurchdringung der ‚Clean Energy Vehicles‘ erreicht werden, solange diese nicht ihre nachteiligen Fahrzeugattribute wie ‚Motorleistung‘ oder ‚Reichweite‘ verbessern können.



Abbildung 6-49: Statisches Szenario Verschärfung GTS: Absatzzahlen nach Fahrzeugtypen

Für die Marktanteile der Fahrzeugtypen am Bestand ergeben sich, aufgrund der minimalen Veränderungen bei den Absatzzahlen, nur unbedeutende Änderungen (Abbildung 6-50). Bezüglich der Emissionen können keine weiteren nennenswerten Reduzierungen im Vergleich zum Referenzszenario beobachtet werden. Aus diesem Grund wird auf eine graphische Darstellung verzichtet.

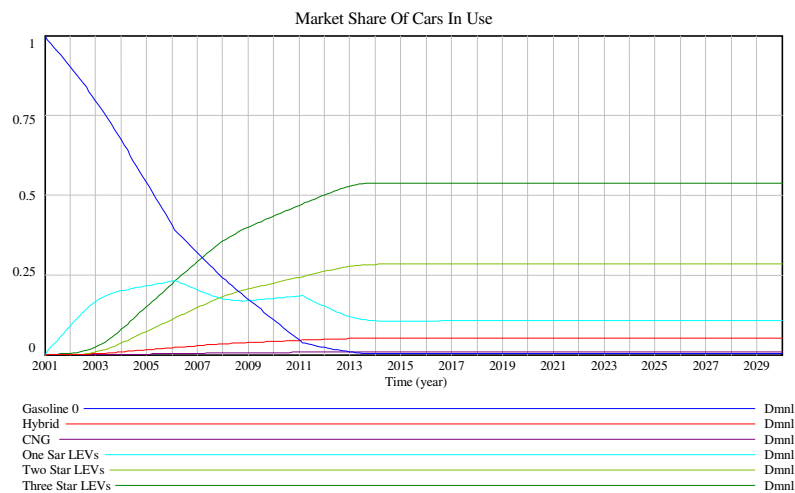


Abbildung 6-50: Statisches Szenario Verschärfung GTS: Marktanteile des Fahrzeugbestandes

Dagegen kann das Ziel einer Verminderung der Rabatte für die ‚Low Emission Vehicles‘ durch die Verschärfung erreicht werden. Abbildung 6-51 zeigt die Reduzierung der Steuerbegünstigungen für die einzelnen Fahrzeugtypen ab 2004 beziehungsweise ab 2006. In Abbildung 6-52 werden die gesamten Rabattzahlungen dargestellt, die im Jahr 2004 und 2006 jeweils einen Rückgang zeigen. Ab 2008 werden nur noch alternative Antriebstechnologien steuerlich begünstigt.

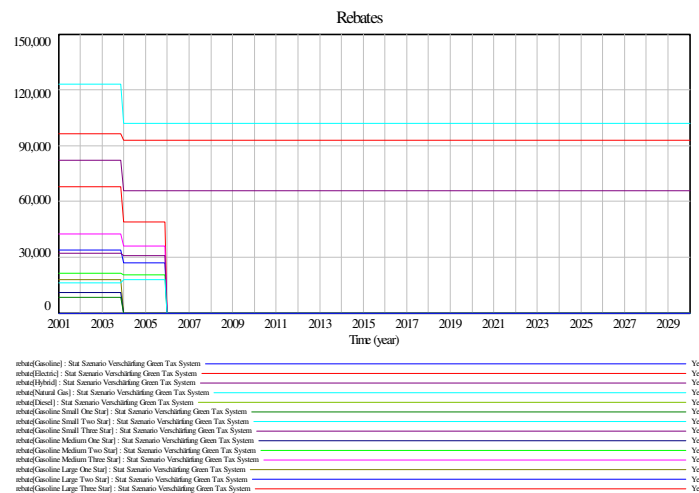


Abbildung 6-51: Statisches Szenario Verschärfung GTS: Rabatte nach Fahrzeugtypen

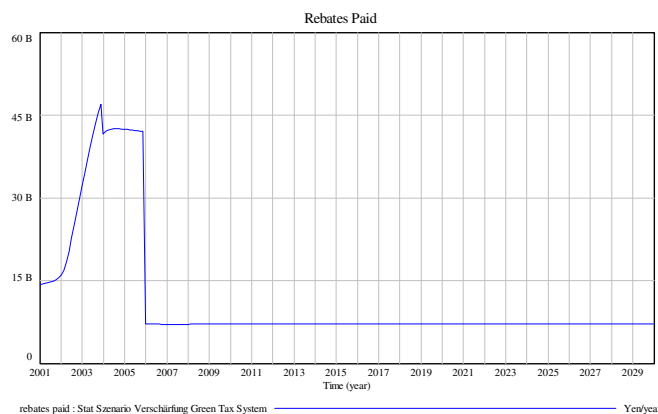


Abbildung 6-52: Statisches Szenario Verschärfung GTS: Ausgaben für Steuerermäßigungen

Mit der Verschärfung des ‚Green Tax Systems‘ können keine wesentlichen Veränderungen bezüglich der Absatzzahlen oder der Marktanteile am Fahrzeugbestand erreicht werden. Damit ergeben sich auch keine nennenswerten Emissionsreduzierungen. Jedoch können durch die Aufhebung von steuerlichen Ermäßigungen für bestimmte Fahrzeugtypen die Ausgaben vermindert werden. Damit stellt die Verschärfung des Steueranreizsystems kein erfolgreiches Instrument zur Senkung der Emissionen dar. Zudem kann keine ausreichende Marktdurchdringung der ‚Clean Energy Vehicles‘ erreicht werden.

Wegen der minimalen Auswirkungen der Verschärfung des ‚Green Tax Systems‘ auf die vom Fahrzeugbestand verursachten Emissionen soll im nächsten Abschnitt die Einführung einer Ökosteuer auf Kraftstoffe im Hinblick auf die Emissionsreduzierung untersucht werden.

6.5.2 Wirkung von Verbrauchsteuern

Durch die Einführung der Ökosteuer steigen die Absatzzahlen der Fahrzeugtypen, die einen sehr geringen Kraftstoffverbrauch haben. Dazu zählen die Kleinfahrzeuge sowie die PKW mit alternativen Antriebstechnologien (Abbildung 6-53 und 6-54). Bei den ‚Medium‘ und ‚Large Vehicles‘ dagegen ist nach der Einführung der Ökosteuer ein deutlicher Rückgang der Neuzu-

lassungen zu beobachten. Die Hybridfahrzeuge weisen die niedrigsten Kraftstoffkosten pro Kilometer auf und erreichen nach der Einführung der Ökosteuer einen Marktanteil von fast 10 Prozent an den Neuzulassungen. Dagegen gehen die Absatzzahlen der Fahrzeugtypen mit hohen Kraftstoffkosten teilweise deutlich zurück. Bei den Dieselfahrzeugen ist trotz der teilweise niedrigeren Kraftstoffkosten gegenüber einigen ‚Low Emission Vehicles‘ keine wesentliche Erhöhung der Verkaufszahlen zu erkennen. Das lässt sich durch die viel höheren Schadstoffemissionen und den geringen Marktanteil erklären.

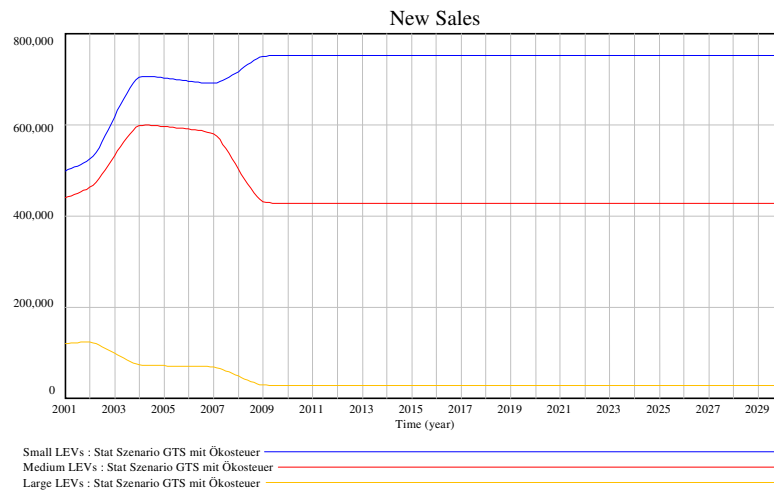


Abbildung 6-53: Statisches Szenario GTS mit Ökosteuer: Absatzzahlen nach Fahrzeuggröße

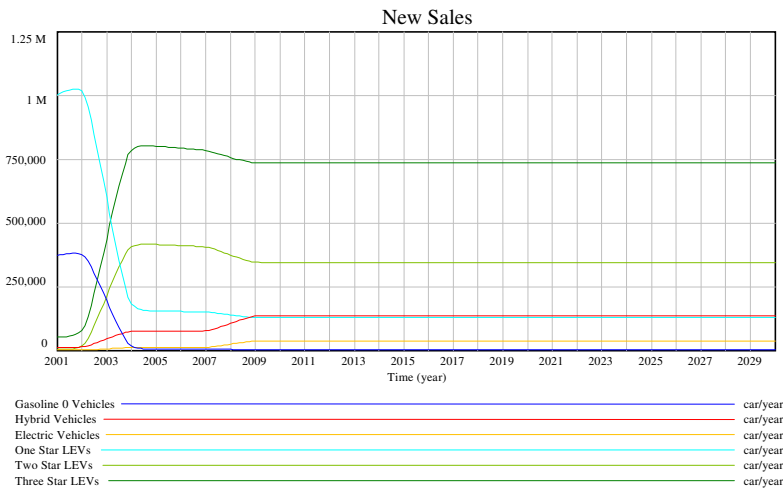


Abbildung 6-54: Statisches Szenario GTS mit Ökosteuer: Absatzzahlen nach Fahrzeugtyp

Die Entwicklung bei den Neuzulassungen wirkt sich zeitverzögert auch auf die Marktanteile am Fahrzeugbestand aus (Abbildung 6-55). Neben den Kleinfahrzeugen ist auch bei den alternativen Antriebsvarianten, insbesondere bei den Hybridfahrzeugen, ein steigender Verlauf der Marktanteile am Bestand zu erkennen. Bei den Kleinwagen weisen lediglich die „One Star Low Emission Vehicles“ einen Rückgang der Marktanteile auf, was sich durch den höheren Verbrauch und die schlechteren Umweltwerte begründen lässt.

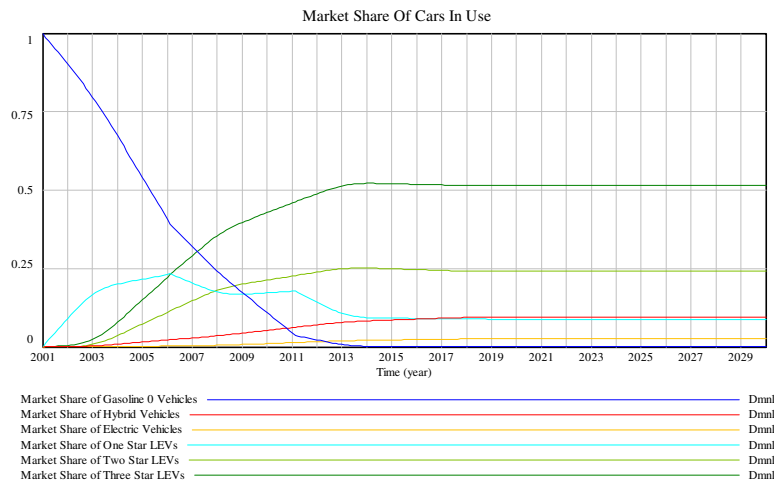


Abbildung 6-55: Statisches Szenario GTS mit Ökosteuer: Marktanteile am Fahrzeugbestand

Die Betrachtung der Emissionen zeigt lediglich bei den Kohlenstoffdioxidwerten eine erkennbare Reduzierung gegenüber dem statischen Referenzszenario (Abbildung 6-56). Die Verminderung der CO₂-Emissionen fällt dabei auch nicht so deutlich aus, wie es die Erwartungen aus dem Extremszenario widerspiegeln. Diese Entwicklung läßt sich vor allem durch die Substitution innerhalb der ‚Low Emission Vehicles‘ erklären. Nur eine signifikante Marktdurchdringung von ‚Clean Energy Cars‘ und Hybridfahrzeugen würde zu weiteren Emissionsreduzierungen führen. Daraus kann gefolgert werden, daß eine Ökosteuer keine Garantie zur Senkung der Emissionen darstellt.

In Abbildung 6-54 ist ab dem Jahr 2007 ein Anstieg der Absatzzahlen der Fahrzeuge mit alternativem Antrieb zu erkennen. In diesem Zusammenhang kann auch ein Anstieg der Rabatzzahlungen beobachtet werden (Abbildung 6-57). Der Grund dafür liegt in den höheren Ermäßigungen für diese Fahrzeugtypen.

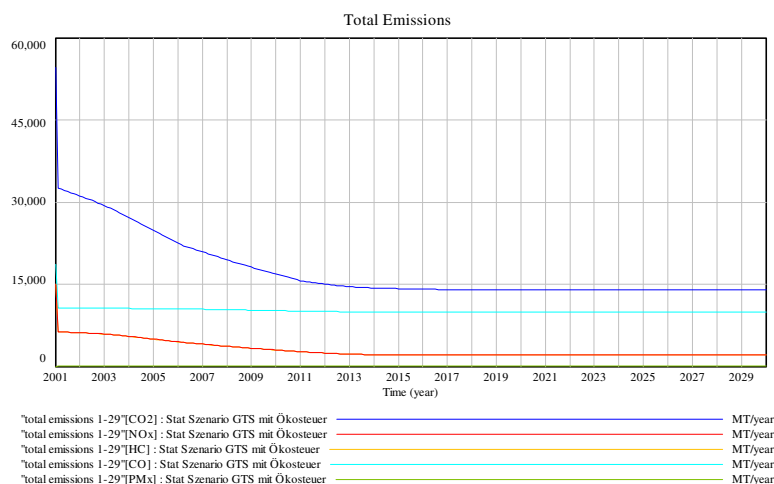


Abbildung 6-56: Statisches Szenario GTS mit Ökosteuer: Emissionen des Fahrzeugbestandes

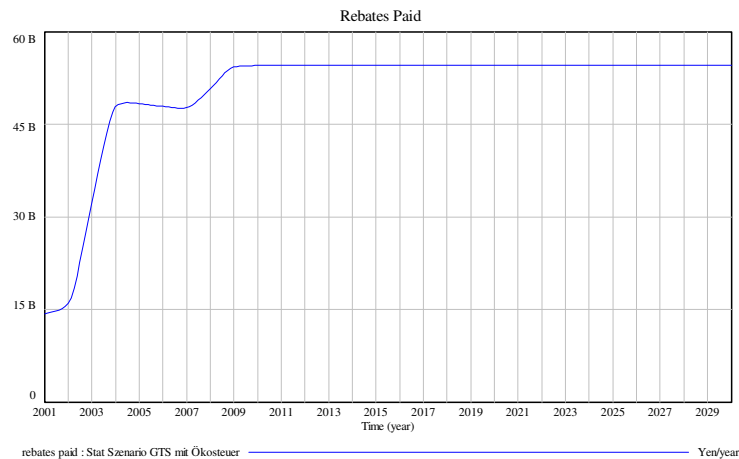


Abbildung 6-57: Statisches Szenario GTS mit Ökosteuer: Ausgaben für die Steuerermäßigungen

Die Ökosteuer bewirkt einen Trend zu Fahrzeugen mit niedrigem Kraftstoffverbrauch und damit geringen Kraftstoffkosten pro gefahrene Kilometer. Dazu zählen neben den Kleinfahrzeugen auch die alternativen Antriebsvarianten. Mit einer zeitlichen Verzögerung setzt sich diese Entwicklung auch im Fahrzeugbestand durch. Durch den Wechsel hin zu kraftstoffeffizienteren Fahrzeugtypen können die Kohlenstoffdioxidemissionen im Vergleich zum statischen Referenzszenario weiter gesenkt werden. Langfristig bleiben sie jedoch auf einem konstanten Niveau. Zudem ermöglicht eine Ökosteuer Zusatzeinnahmen, die für weitere Förderprogramme eingesetzt werden können.

6.5.3 Kombination der umweltpolitischen Instrumente

Im folgenden sollen die beiden obengenannten Instrumente kombiniert werden. Bei den Absatzzahlen kann man die Entwicklungen der einzelnen oben beschriebenen Szenarien wieder erkennen (Abbildung 6-58). Bis etwa 2008 entsprechen die Verläufe der Verkaufszahlen dem statischen Referenzszenario. Nach 2008 beeinflusst die Kombination aus Ökosteuer und nicht-linearer Anpassung der Fahrzeugattribute die weitere Entwicklung. Die alternativen Antriebstechnologien können sich, bedingt durch die Einführung der Ökosteuer und das Angleichen der Attribute, relativ früh auf dem Markt durchsetzen. Weiterhin ist der im Referenzszenario bereits beschriebene Trend zu den Kleinwagen zu erkennen. Dieser wird durch die Ökosteuer zusätzlich begünstigt. Die Entwicklung der Absatzzahlen der Ergas- und Elektrofahrzeuge erscheint aufgrund des frühen Zeitpunktes unrealistisch, ist jedoch langfristig gesehen durchaus denkbar. Der abnehmende Verlauf der ‚Low Emission Vehicles‘ ist auf die Marktdurchdringung der alternativen Antriebstechnologien zurückzuführen.

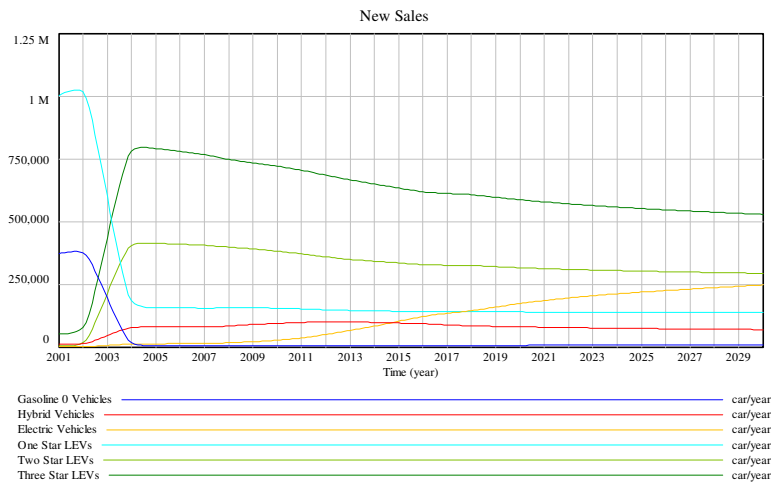


Abbildung 6-58: Dynamisches Szenario GTS, Verschärfung und Ökosteuer: Absatzzahlen

Die Marktanteile am Fahrzeugbestand spiegeln den Trend der Absatzzahlen zeitverzögert wieder (Abbildung 6-59).

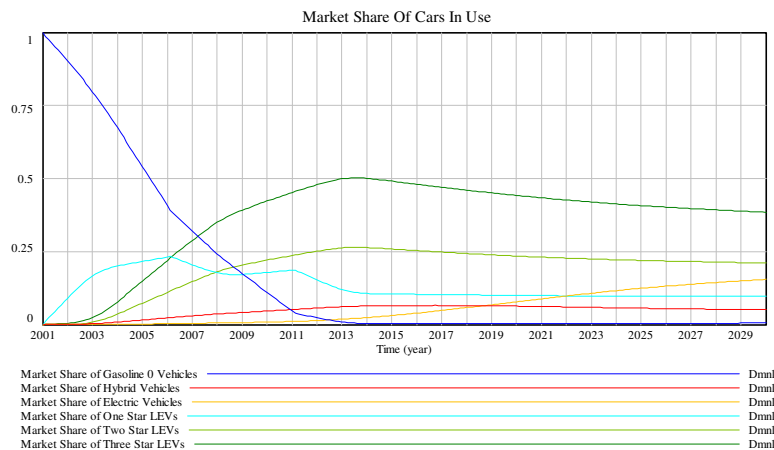


Abbildung 6-59: Dynamisches Szenario GTS, Verschärfung und Ökosteuer: Marktanteile

Die alternativen Antriebe können sich im Zeitverlauf auf dem Markt etablieren und erhöhen ihre Anteile bis zum Ende der Simulation. Dadurch nehmen die Marktanteile der ‚Low Emission Vehicles‘ mit der Zeit ab. Die ‚Gasoline 0‘-Fahrzeuge werden wie im dynamischen Referenzszenario bis 2014 aus dem Fahrzeugbestand verdrängt.

Mit der Marktdurchdringung der alternativen Antriebe werden in diesem Szenario die Emissionen deutlich reduziert (Abbildung 6-60). Besonders die Kohlenstoffdioxidemissionen verzeichnen einen sehr deutlichen Rückgang. Analog zum dynamischen Referenzszenario können auch hier die Kohlenstoffmonoxidemissionen gesenkt werden. Einen erheblichen Anteil an der Reduzierung der Emissionen hat die Marktdurchdringung der emissionsfreien Elektrofahrzeuge. Die Partikelemissionen sind aufgrund der niedrigen Anteile der Dieselfahrzeuge sehr gering. Durch die Kombination der Ökosteuer und der nichtlinearen Angleichung der Fahrzeugattribute kann über den gesamten Simulationszeitraum eine Emissionssenkung erreicht werden.

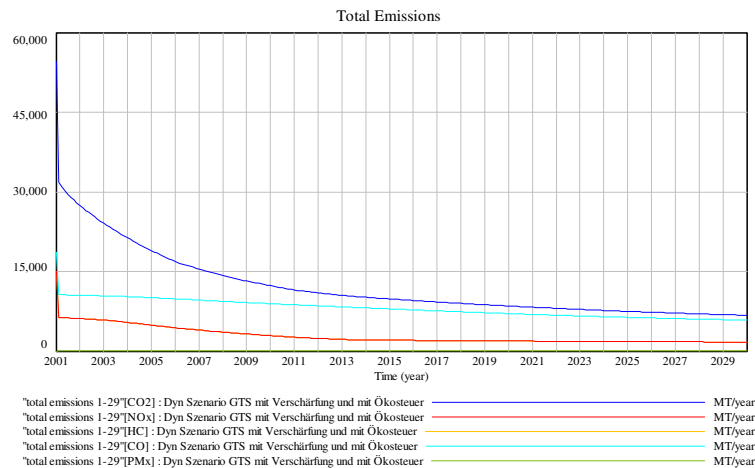


Abbildung 6-60: Dynamisches Szenario GTS, Verschärfung und Ökosteuer: Emissionen

In Abbildung 6-61 wird der Ausgabenverlauf für die Verbreitung der ‚Low Emission Vehicles‘ und ‚Clean Energy Vehicles‘ dargestellt. Bis zum Jahr 2006 ist der Verlauf analog zum Szenario mit der Verschärfung des ‚Green Tax Systems‘. Im selben Jahr gehen die Ausgaben – aufgrund der Aufhebung der steuerlichen Förderung von LEVs – deutlich zurück. Der anschließende Anstieg der Rabattzahlungen lässt sich durch die gestiegenen Absatzzahlen der alternativen Antriebsvarianten erklären, die bis zum Jahr 2015 weiterhin gefördert werden. Die Aufhebung der kompletten steuerlichen Ermäßigung kann mit der Marktdurchdringung dieser Fahrzeugtypen begründet werden.

Die Kombination aus Verschärfung des ‚Green Tax Systems‘ und Erhebung einer Ökosteuer mit einer nichtlinearen Anpassung der Fahrzeugattribute im Zeitverlauf stellt die beste Lösung im Hinblick auf die Zielgrößen dar. Neben einer deutlichen Reduzierung sämtlicher Emissionen bis zum Ende der Simulation können auch die Ausgaben für das Steueranreizsystem gesenkt werden.

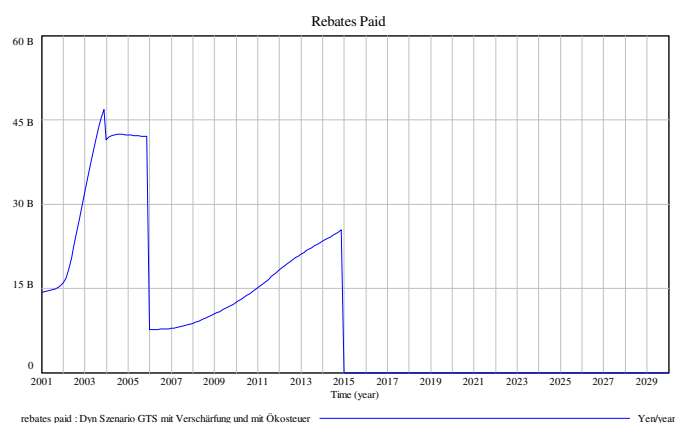


Abbildung 6-61: Dynamisches Szenario GTS, Verschärfung und Ökosteuer: Ausgaben für Rabatte

Genau wie die Ergebnisse in der deutschen Modellanwendung, werden im folgenden Abschnitt 6.6 die Ergebnisse der Szenarien im japanischen Modell einzeln gegenübergestellt und ausgewertet.

6.6 Zusammenfassende Gegenüberstellung und Auswertung der erzielten Ergebnisse

Auf Grundlage der untersuchten Szenarien für Deutschland und Japan lassen sich folgende Ergebnisse zusammenfassen. Im deutschen Modell ist in elf Szenarien eine Wirkungsabschätzung von alternativen Antriebs- und Kraftstoffstrategien bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen und voneinander abweichendem Instrumenteneinsatz untersucht worden. Die folgenden beiden Tabellen bilden die Ergebnisse der Szenarios noch einmal übersichtlich ab. Tabelle 6.2 zeigt die Einflüsse von Veränderungen der exogenen Rahmenbedingungen auf die Emissionsentwicklung im Individualverkehr (Szenario 1-6). In Tabelle 6.3 findet sich die zweite Gruppe der Szenarien (7-11), welche den Einfluß von ökonomischen Instrumenten der Umweltpolitik auf die Emissionsentwicklung untersuchen.

Die derzeit zu erwartenden technologischen Entwicklungen führen ohne den Einsatz ökonomischer Instrumente nicht zu signifikanten Emissionsminderungen (Szenario 2). Mit dem Einsatz von alternativen Kraftstoffen (GTL, BTL) lassen sich zum einen die Emissionen sofort und in der gesamten Fahrzeugflotte reduzieren, zum anderen tragen alternative Kraftstoffe zu einer ‚Streckung‘ der Rohstoffvorräte und damit zu einer Erhöhung der Versorgungssicherheit bei. Dabei stellt sich heraus, daß deren Einsatz einen positiven Einfluß auf die Bestandsentwicklung der Ottomotoren ausübt, die Marktdurchdringung von Brennstoffzellenfahrzeugen aber bremst. Hierbei ergeben sich zudem deutliche Reduktionen der CO₂-, HC- und CO-Emissionen, während die NO_x- und Partikelemissionen kaum beeinflusst werden. Von den alternativen Kraftstoffen kommen zwar zunächst biogene Komponenten in Mischung mit konventionellen Kraftstoffen zum Einsatz, moderne Motoren – wie zum Beispiel die HCCI-Technologie (siehe 2.4.4) – erfordern aber eine höhere Qualität wie synthetische GTL- und BTL-Kraftstoffe (Szenario 3).

Signifikante Emissionsminderungen sind bei einer weiteren kontinuierlichen Optimierung der Antriebstechniken zu erzielen (z. B. Hubraumverkleinerung, Gewichtsreduzierung, Reduzierung von Fahrwiderständen). Alle Emissionsarten lassen sich dadurch reduzieren, wobei der Bestand von konventionellen Otto- und Dieselantrieben stärker von einer solchen Umsetzung profitiert. Konventionelle Antriebe haben zudem eine hohe Akzeptanz beim Kunden und bestimmen mittelfristig noch den Automobilsektor (Szenario 4).

Es zeigt sich, daß eine Änderung der jährlichen spezifischen Fahrleistung ebenfalls zu einer Emissionsminderung führt, jedoch keine Auswirkungen auf die Bestandsentwicklung der unterschiedlichen Fahrzeugtypen hat (Szenario 5). Experten halten Wasserstoff in Kombination mit der Brennstoffzelle für die dauerhaft tragfähigste Technologie. Abgesehen von technischen Problemen sind die hohen Kosten der Bereitstellung von Wasserstoff eine der Hürden bei der Verbreitung der Brennstoffzelle. Die Erhöhung der Wareneinstandspreise fossiler Energieträger (Szenario 6) führt zu geringen Bestandsverschiebungen. Lediglich am Ende der

Simulation ist die zunehmende Verbreitung von Brennstoffzellenfahrzeugen zu beobachten. Ein signifikanter Einfluß auf die Gesamtemissionen ist indes nicht nachweisbar.

Tabelle 6-3: Szenarien mit Variation der Rahmenbedingungen (Szenario 1-6)

Szenario	Beschreibung	Marktanteil am Ende des Simulationszeitraums	Emissionen
1	Kraftstoff- und Kaufpreise, Verbrauch, Kraftstoffzusammensetzung über den Simulationszeitraum konstant, ohne äußere Einflüsse	40 Mio. Otto- und Dieselfahrzeuge, Hybrid-, Elektroantriebe, Brennstoffzelle als Nischenfahrzeuge	CO ₂ , CO stabil HC, NO _x , PM steigen
2	Technischer Fortschritt	Weniger konventionelle Antriebe, Hybridantriebe nehmen im Vergleich zu Szenario 1 leicht zu, 1 Mio. Brennstoffzellenfahrzeuge im Bestand	Weniger CO ₂ , CO, HC als in Szenario 1, NO _x sinkt leicht, PM sinkt überproportional im Vergleich zu Szenario 1
3	Sensitivitätsanalyse: Verbindliche Nutzung von Biokraftstoff	Je mehr verpflichtende alternative Kraftstoffe (BTL), desto weniger Benzin-/Benzin-/Hybridantriebe im Bestand	Je mehr BTL, desto weniger CO ₂ / CO/ HC, kein signifikanter Einfluß auf PM und NO _x
4	Sensitivitätsanalyse: Verringerung des Kraftstoffverbrauchs	Je mehr die Kraftstoffeffizienz steigt, desto weniger Hybrid- und Elektro-/Brennstoffzellenfahrzeuge	Je höher die Kraftstoffeffizienz, desto mehr Emissionen lassen sich reduzieren
5	Variation der durchschnittlichen Fahrleistung pro Jahr	Kein Einfluß auf den Fahrzeugbestand im Vergleich zu Szenario 1	Proportionale Reduktion von Emissionen im Vergleich zu Szenario 1
6	Steigerung der Preise für fossile Kraftstoffe	Erdgas, Hybrid- und Elektrofahrzeuge steigen an, Brennstoffzellen nehmen am Ende des Simulationszeitraums signifikant zu.	Geringer Einfluß auf die absoluten Emissionen

Im Hinblick auf einen Einsatz ökonomischer Instrumente führt die Umstellung von der hubraum- auf eine CO₂-basierte Kfz-Steuer (Szenario 7) bis zur Mitte des Simulationszeitraums 2020 zunächst zu einer zunehmenden Verbreitung von Hybridfahrzeugen und geht dann in eine Verschiebung von Marktanteilen zugunsten der Brennstoffzellenfahrzeuge über. Den höchsten Marktanteil stellen gleichwohl auch im Jahr 2035 Fahrzeuge mit Dieselantrieb dar. Die CO₂, HC, CO und NO_x-Emissionen lassen sich durch die Umstellung der Kfz-Steuer geringfügig reduzieren.

Die Einführung einer Maluszahlung für Dieselfahrzeuge ohne Partikelfilter bewirkt eine rasche Senkung der Partikelemissionen, da infolge dieser Steuer eine zügige Nachrüstung von Filtern bei den entsprechenden Dieselfahrzeugen erfolgt (Szenario 8). Die Erhebung von Bonus- und Maluszahlungen auf die Kaufpreise mit einer homogenen Förderungssumme pro Fahrzeug bei maximaler Ausnutzung der Finanzierbarkeit im Zusammenhang mit der Umstellung der Kfz-Steuer und den daraus resultierenden Ökosteuererhöhungen führt zu einer signifikanten Steigerung der Marktanteile von alternativen Antrieben (Hybridantriebe, Brennstoffzelle), so daß deren Bestände ab Mitte der 2020er Jahre größer sind als diejenigen der konventionellen Antriebskonzepte. Mit dieser Strategie können Verbesserungen hinsichtlich aller untersuchten Emissionsarten nachgewiesen werden, so daß sich auch die NO_x-Emissionen

nach einem zwischenzeitlichen Anstieg unter das Niveau von 2005 reduzieren (Szenario 9, 11).

Die erreichten Emissionssenkungen, aufgrund der Zahlung von Verschrottungsprämien, sind hauptsächlich auf die Reduzierung des gesamten Fahrzeugbestandes zurückzuführen, da keine Verschiebung der Marktanteile nachzuweisen sind (Szenario 10). Als problematisch erweist sich die Reduktion der NO_x-Emissionen, die sich trotz der Förderung alternativer Kraftstoff- und Antriebsstrategien im Unterschied zu den anderen Emissionen nicht signifikant reduzieren.

Tabelle 6-4: Szenarien mit Einsatz ökonomischer Instrumente (Szenario 7-11)

Szenario	Beschreibung	Marktanteil am Ende des Simulationszeitraums	Emissionen
7	Reform der Kfz-Steuer von Hubraum auf (CO ₂ -)Emissionen	Steigerung der Elektrofahrzeuge, insbesondere Brennstoffzelle	Langfristig nur geringe CO ₂ -, CO-, HC-, NO _x -, Emissionen Keine Reduktion von PM
8	Sensitivitätsanalyse: 0-800 EUR Malus für Dieselfahrzeuge ohne Partikelfilter	Je höher der Malus, desto schneller sinkt der Anteil der Dieselfahrzeuge ohne Partikelfilter	Signifikante Minderungen bei PM (4/5 innerhalb eines Jahres für einen Malus von 800 EUR
9	Reform der Kfz-Steuer, Filter Malus von 300 EUR, Bonuszahlungen für umweltfreundliche Fahrzeuge	Signifikanter Rückgang von konventionellen Fahrzeugen, starker Anstieg von Hybrid und Brennstoffzellenfahrzeugen	Signifikante Reduktion von allen Emissionen
10	Szenario 9 + Verschrottungsprämien	Keine Veränderung der Marktanteile im Vergleich zu Szenario 9, keine Verjüngung der Fahrzeugflotte, aber signifikante Reduktion des Gesamtfahrzeugbestandes	Proportional niedrigere Emissionen im Vergleich zu Szenario 9
11	Szenario 9, aber gleichartige Kaufpreise bei allen Technologien	Otto- und Dieselfahrzeuge vergleichbar mit Szenario, Anzahl der Brennstoffzellenfahrzeuge am höchsten im Vergleich zu den anderen Szenarien	Niedrigste CO, HC, CO ₂ -Emissionen von allen Szenarien. Keine Veränderung in PM, leichte Zunahme von NO _x im Vergleich zu Szenario 9

Das statische Referenzszenario (Szenario 1) im japanischen Modell (Fahrzeugattribute während des Simulationszeitraums konstant) zeigt nach Einführung des ‚Green Tax Systems‘ als Bonus-/ Malussystem im Jahr 2001 einen deutlichen Trend zum Kauf umweltfreundlicher Fahrzeugtypen (‚Low Emission Vehicles‘) und damit zur schrittweisen Substitution ‚herkömmlicher‘ Benzinfahrzeuge. Dabei werden besonders die 2- und 3-Sterne Fahrzeuge (‚Ultra Low Emission Vehicles‘) bevorzugt. Bei den alternativen Antriebstechnologien gelingt lediglich den Hybridfahrzeugen eine Marktdurchdringung. Bei den Simulationsergebnissen ist zudem ein Trend zu kleineren Fahrzeugen zu beobachten. Mit der Verbreitung der ‚Low Emission Vehicles‘ gelingt es der japanischen Regierung die Emissionen zunächst deutlich zu senken. Nach einem ersten Rückgang können keine weiteren Emissionsreduzierungen beobachtet werden. Die Ausgaben für die Steuerermäßigungen steigen innerhalb kürzester Zeit

deutlich über das zur Verfügung stehende Budget und verbleiben ab 2008 auf einem konstanten Niveau oberhalb von 45 Billionen Yen pro Jahr (333 Millionen Euro).

Im dynamischen Referenzszenario (Szenario 2) im japanischen Modell (nichtlineare Angleichung der Fahrzeugattribute) ergeben sich bis zum Jahr 2007 analoge Simulationsergebnisse zum statischen Referenzszenario. Ab diesem Zeitpunkt steigen die Absatzzahlen der Erdgas- und Elektrofahrzeuge – aufgrund der simulierten Verbesserungen der Fahrzeugattribute – an. Diese Entwicklung lässt sich zeitverzögert auch bei den Marktanteilen am Fahrzeugbestand erkennen. Dadurch gelingt es, die Emissionen bis zum Ende der Simulation deutlich zu reduzieren. Die Ausgaben für die steuerliche Förderung der umweltfreundlichen Fahrzeuge steigen durch die erhöhten Absatzzahlen der Erdgas- und Elektrofahrzeuge bis zum Jahr 2030 auf über 60 Billionen Yen pro Jahr (444 Millionen Euro).

Mit der Verschärfung des ‚Green Tax Systems‘ (Szenario 3) können keine wesentlichen Veränderungen bezüglich der Zielgrößen Absatz oder der Marktanteile am Fahrzeugbestand erreicht werden. Damit ergeben sich auch keine nennenswerten Emissionsreduzierungen. Jedoch können durch die Aufhebung von steuerlichen Ermäßigungen für bestimmte Fahrzeugtypen die Ausgaben vermindert werden. Damit stellt die Verschärfung des Steueranreizsystems kein erfolgreiches Instrument zur Senkung der Emissionen dar. Zudem kann keine Marktdurchdringung der ‚Clean Energy Vehicles‘ erreicht werden.

Die Einführung der Ökosteuer (Szenario 4) auf die Kraftstoffe Benzin und Diesel bewirkt einen Trend zu Fahrzeugen mit niedrigem Kraftstoffverbrauch und damit geringen Kraftstoffkosten pro gefahrenen Kilometer. Dazu zählen neben den Kleinfahrzeugen auch die alternativen Antriebsvarianten, insbesondere Hybridfahrzeuge. Mit einer zeitlichen Verzögerung setzt sich diese Entwicklung auch im Fahrzeugbestand durch. Durch den Wechsel hin zu kraftstoffeffizienten Fahrzeugtypen können die Kohlenstoffdioxidemissionen im Vergleich zum statischen Referenzszenario weiter gesenkt werden. Langfristig bleiben sie jedoch auf einem konstanten Niveau. Zudem ermöglicht eine Ökosteuer Zusatzeinnahmen, die für weitere Förderungsprogramme eingesetzt werden können.

Die Kombination aus Verschärfung des ‚Green Tax Systems‘ (Szenario 5) und stufenweiser Erhöhung der Ökosteuer mit einer nichtlinearen Anpassung der Fahrzeugattribute im Zeitverlauf (‚Zukunftsszenario‘) stellt die beste Lösung im Hinblick auf die Zielgrößen dar. Wie bei den Referenzszenarien ist ein Trend zu kleineren Fahrzeugen zu beobachten. Mittel- bis langfristig setzen sich alternative Antriebsvarianten durch. Das gilt insbesondere für Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge. Neben einer deutlichen Reduzierung sämtlicher Emissionen bis zum Ende der Simulation können auch die Ausgaben für das Steueranreizsystem gesenkt werden.

Im japanischen Modell werden in zwei Szenarien die Auswirkungen des Steuerbonussystems ‚Green Tax System‘ und der Ökosteuer analysiert. Im Rahmen des komplexen japanischen

Steuersystems für PKW wurde die Automobilsteuer als kaufentscheidend identifiziert und deshalb zur Berechnung der Marktanteile herangezogen. Sie hat für die Käufer eines Fahrzeugs mit großem Hubraum eine geringere Bedeutung als für die potentiellen Konsumenten eines Kleinwagens.

Tabelle 6-5: Übersicht der Szenarien im Modell Japan (Szenario 1-5)

Szenario	Beschreibung	Marktanteil am Ende des Simulationszeitraums	Emissionen
1	Szenario mit konstanten Parametern	„Gasoline 0“-Fahrzeuge sinken deutlich, Hybridfahrzeuge steigen auf 5 Prozent, ULEV bei 52%	CO ₂ , CO, HC, NO _x rückläufig PM
2	Szenario mit nichtlinearer Angleichung der Fahrzeugattribute „Technischer Fortschritt“	Alternative Antriebe „Clean Energy Cars“ (Erdgas, Elektro/Brennstoffzelle) steigen auf 20 Prozent	Proportional niedrigere Emissionen im Vergleich zu Szenario 1
3	Verschärfung des „Green Tax System“	Siehe Szenario 2, aber Verminderung der Rabattzahlungen durch das „New Green Tax System“	Siehe Szenario 2
4	Wirkung von Verbrauchssteuern	Steigender Verlauf der alternativen Antriebe „Clean Energy Cars“, Zunahme von Kleinwagen, Zusatzeinnahmen für weitere Förderprogramme	Verminderung der CO ₂ -Emissionen im Vergleich zum Szenario 1
5	Kombination der umweltpolitischen Instrumente	Keine „Gasoline 0“-Fahrzeuge, Alternative Antriebe etablieren sich, insbesondere Elektro/Brennstoffzelle, Ausgaben für das Steuersystem sinken stetig	CO ₂ , CO, HC, NO _x , PM stark rückläufig

7 Schlußfolgerungen und Handlungsempfehlungen

In der vorliegenden Arbeit erfolgt die Konzeption eines rechnergestützten Planungssystems zur Bewertung von Politikoptionen im Individualverkehr sowie die Anwendung auf ein Fallbeispiel zur Wirkungsabschätzung von umwelt- und verkehrspolitischen Regulierungen auf dem deutschen und japanischen Markt. Auf Grundlage der im Fallbeispiel Deutschland und Japan untersuchten Szenarien lassen sich für politisch Handelnde wesentliche Empfehlungen für die strategische Gestaltung des Individualverkehrs ableiten. Die Ergebnisse des Fallbeispiels richten sich zudem an Automobilhersteller, welche innerhalb des produktbezogenen Umweltschutzes ihr jeweiliges Produktportfolio frühzeitig nach den Maßstäben einer dauerhaft tragfähigen Entwicklung auszurichten haben. Schließlich bieten die Szenarien auch weiteren Akteursgruppen, wie den Kunden, der Wissenschaft sowie Nichtregierungsorganisationen und weiteren Anspruchsgruppen Hilfestellung bei der Beurteilung von umweltpolitischen Instrumenten im Individualverkehr.

7.1 Schlußfolgerungen und kritische Würdigung des gewählten Modellierungsansatzes

Im Rahmen der Arbeit erfolgt in einem ersten Schritt eine empirische Analyse der komplexen natürlichen, technisch-ökonomischen, politisch-rechtlichen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen im Individualverkehr. Erst auf Grundlage dieser Analyse können die Erfolgsfaktoren politischer Instrumente erarbeitet werden. Darüber hinaus erfordert die nachfolgende Konzeption praxisrelevanter Modell- und Bewertungsansätze detaillierte Kenntnisse über die Stoff- und Finanzströme sowie über die Akteure, Prozesse und Wirkungszusammenhänge. Bei der Analyse der durch den Individualverkehr verursachten lokal wirksamen Luftverunreinigungen werden teilverbrannte Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid, Stickoxide und Feinstaub als Zielgrößen identifiziert, da sie besonders in Ballungsgebieten zur Bildung von Smog beitragen und sich unmittelbar gesundheitsschädigend auf den Menschen auswirken. Das überregional wirksame Klimagas Kohlendioxid hat – als weitere Zielgröße – den (absolut) größten Anteil am anthropogenen Treibhauseffekt. Die Analyse der Umweltsituation in dieser Arbeit schafft die Voraussetzung, das Minderungspotential von alternativen Antriebsaggregaten, die Möglichkeiten zur Optimierung der Abgasnachbehandlung durch Partikelfiltersysteme bei konventionellen Verbrennungsmotoren und die gezielte Zugabe von synthetischen Kraftstoffen aus Erdgas und Biomasse zu den konventionellen Kraftstoffen zu untersuchen, um auf diese Weise die obengenannten Schadstoff- und CO₂-Emissionen dauerhaft zu senken. Hierbei beschränkt sich die Bewertung auf die beim Fahrzeugbetrieb anfallenden Emissionen (Kapitel 2).

Um die Verbreitung alternativer Antriebe und Kraftstoffe voranzutreiben, bedient sich der Gesetzgeber einer breiten Palette politischer Maßnahmen. Mit Hilfe einer Analyse umwelt-

und verkehrspolitischer Instrumente gelingt es in der vorliegenden Arbeit, geeignete Werkzeuge zur Schadstoff- und CO₂-Minderung zu identifizieren. Dazu gehören neben ökonomischen Werkzeugen, wie Verbrauchssteuern auf Kraftstoffe, CO₂-basierte Kfz-Steuern, Bonus-/Maluszahlungen auf Kaufpreise, Partikelfilternachrüstungen sowie Verschrottungsprämien für Altfahrzeuge, auch ordnungsrechtliche Vorgaben in Form von Abgasgrenzwerten, Richtlinien zur Einführung von Biokraftstoffen und Maßnahmen zur Ausstattung von Neufahrzeugen mit Partikelfiltersystemen. Diese Instrumente werden vom Gesetzgeber mit entsprechenden Verbraucherinformationen zu umweltfreundlichen Fahrzeugen gestützt (Umweltkennzeichen). Den Automobilherstellern wird – durch die in ihrer Wirkung voneinander abweichenden politischen Instrumente sowie die vielfältigen Wirkungszusammenhänge im dynamisch komplexen System 'Individualverkehr' – die Antizipation der zukünftigen politisch-rechtlichen und der sich daraus ergebenden technisch-ökonomischen Veränderungen erheblich erschwert. Dies bedingt die Notwendigkeit der Entwicklung eines flexiblen Werkzeugs zur Entscheidungsunterstützung, das sowohl den politisch als auch den unternehmerisch Handelnden in die Lage versetzt, die Wirkung von Instrumentenkombinationen und von Veränderungen der exogenen Rahmenbedingungen abzuschätzen (Kapitel 3).

Die vorliegende Arbeit ermöglicht auf der Grundlage der durchgeführten Umwelt- und Instrumentenanalyse die Ableitung von Anforderungen an einen Forschungsansatz zur strategischen Gestaltung des Individualverkehrs. Das System 'Individualverkehr' bildet ein dynamisches Geflecht individueller Entscheidungen ab, welche nicht vollständig zu erfassen sind. Die erarbeiteten Anforderungen machen deutlich, daß für die Wirkungsabschätzung umweltpolitischer Instrumente sowohl quantitative als auch qualitative Informationen notwendig sind. Im Gegensatz zu anderen Verfahren erlauben systemkybernetische Methoden eine auf Kausalzusammenhängen beruhende modellhafte Nachbildung sozio-ökonomischer Prozesse. Hierbei ist nur eine begrenzte Datenbasis erforderlich und die Untersuchung neuer, einmaliger Planungssituationen und somit bisher noch nicht eingesetzter umweltpolitischer Lenkungsinstrumente ist möglich. Insbesondere die Methode 'System Dynamics' fördert hierbei das Systemverständnis, indem die Methode interaktive Experimente auf Basis von Simulationen ermöglicht. Dies erlaubt Analysen bezüglich des Einflusses verschiedener Parameter. Zur Analyse der Kaufentscheidung auf Automobilmärkten bietet sich die Theorie diskreter Auswahlentscheidungen ('Discrete Choice Theory') an (Kapitel 4).

Erst die Ableitung von Anforderungen an einen Forschungsansatz sowie die geeignete Auswahl schafft die Voraussetzung für die Entwicklung eines Managementsimulators. Unter Verwendung einer Simulationssoftware werden die Beziehungen zwischen den Antriebs- und Kraftstoffstrategien hierbei in Form von Matrizen abgebildet. Über einen Simulationszeitraum von 30 Jahren wird der Fahrzeugbestand mittels einer Alterungskette von sechs bzw. drei Klassen simuliert. Dadurch gelingt es, aus dem Fahrzeugbestand sowie der für die jeweilige Alterungsklasse und Antriebstechnologie angenommenen Fahrleistung die zukünftigen Emissionen zu berechnen. Der Absatz von Neufahrzeugen wird hierbei unter Berücksichtigung der

Entwicklung von Fahrzeugeigenschaften und Rahmenbedingungen über ein sozial induziertes Präferenzenmodell (Verhaltensmodell) modelliert. Dazu werden die Nutzenfunktionen verschiedener Fahrzeugattribute bestimmt und die Präferenzen der deutschen und japanischen Autokäufer ermittelt und mittels Koeffizienten abgebildet. Hierbei kann der Gesetzgeber, die Entscheidung des Kunden durch verschiedene Anreizsysteme indirekt zu beeinflussen und dadurch eine Reduzierung der Emissionsbelastungen herbeiführen. Dabei ist in dem entwickelten Modell sowohl die Einstellung und Variation von exogenen Rahmenbedingungen möglich, als auch die Steuerung der umweltpolitischen Instrumente. Im Modell werden unterschiedliche Varianten zur Finanzierung des Instrumenteneinsatzes entwickelt, in denen Ausgaben für Förderinstrumente mit Einnahmen von Maluszahlungen und einem – frei wählbaren – ‚Zuschuß‘ durch Einnahmen aus der Ökosteuer ausgeglichen werden können. Damit eine vergleichbare Bewertung der alternativen Antriebs- und Kraftstoffstrategien durchgeführt werden kann, erfolgt die Entwicklung von Autopiloten, die als ‚virtuelle Politiker‘ fungieren und über geschlossene Regelkreise eine Einhaltung der vorgegebenen Intensitäten des Instrumenteneinsatzes gewährleisten (Kapitel 5).

Im deutschen Modell wird mit Hilfe der verschiedenen Modellvarianten in elf Szenarien erstmalig die Wirksamkeit der alternativen Antriebs- und Kraftstoffstrategien bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen und Instrumenteneinsätzen untersucht. Für die Modellierung des japanischen Automobilmarktes wird die Fahrzeugflotte des Herstellers Toyota als Referenzbestand herangezogen. Mit Hilfe einer „Gaming“-Variablen kann der Anwender eine nichtlineare Angleichung der Fahrzeugattribute festlegen und dadurch die technologische Weiterentwicklung der Fahrzeuge simulieren.

Insgesamt zeigt die vorliegende Arbeit erstmalig Lösungsmöglichkeiten zur Beseitigung von Defiziten in der quantitativen Bewertung ordnungspolitischer Maßnahmen auf. Hierbei gelingt in einem praxisorientierten Ansatz die Analyse vielfältiger politischer Instrumente im Bereich des Individualverkehrs. Der Ansatz wird hierbei sowohl am Fallbeispiel Deutschland als auch am Fallbeispiel Japan angewandt, wodurch die Eignung und die Anwendbarkeit des entwickelten Modells nachgewiesen werden können. Das entwickelte Konzept eines Kausalmodells zur Bewertung politischer Instrumente im Automobilbereich und zur Entscheidungsunterstützung bei der Gestaltung des Individualverkehrs kann zudem auf andere Märkte und Industriezweige übertragen werden.

7.2 Ableitung von Handlungsempfehlungen

Nach der kritischen Würdigung der Arbeit sollen aus den in Kapitel 6 ermittelten Ergebnissen Handlungsempfehlungen sowohl für politische und unternehmerische Entscheidungsträger als auch für Kunden und die Wissenschaft abgeleitet werden.

7.2.1 Politische Entscheidungsträger

Politische Entscheidungsträger müssen damit rechnen, daß durch umwelt- und verkehrspolitische Regulierungen ein unsicheres und unkalkulierbares wirtschaftspolitisches Umfeld zu schaffen – zum Beispiel dadurch, daß sich unabgestimmte Regulierungsmaßnahmen entlang der Wertschöpfungskette neutralisieren oder unbeabsichtigte negative Wirkungen entfalten.

Unterschiedliche Anforderungen und voneinander abweichende umweltpolitische Ziele führen zu erheblichen Unsicherheiten und Verzögerungen in Bezug auf Investitionen, mit unerwünschten Folgen für eine dauerhaft tragfähige Produktstrategie seitens der Hersteller. So entsteht, wie in Kapitel 2 erläutert, eine physikalische Konfliktsituation bei gleichzeitiger CO₂ und NO_x-Reduktion. Stickoxide entstehen unter anderem bei hohen Brennraumtemperaturen. Je höher der Wirkungsgrad mit steigender Verbrennungstemperatur, desto mehr NO_x bildet sich. Differierende Ziele treten, wie in Kapitel 2 angeführt, auch zwischen gesetzlichen Sicherheitsanforderungen sowie höherem Fahrzeuggewicht der nachgefragten Fahrzeugkonzepte und Kraftstoffverbrauch auf. So erfordert der Fußgängerschutz eine Erhöhung der Fahrzeugmasse, hat aber damit gleichzeitig einen negativen Einfluß auf die CO₂-Emissionen. Und auch die in der Altautorichtlinie vorgegebenen Recyclingquoten stehen im Konflikt mit Verbrauchszielen, da sie die Verwendung von alternativen Werkstoffen zur Gewichtsreduktion oder die Verbesserung der Effizienz des Antriebsstrangs erschweren. Die Politik verfehlt möglicherweise sowohl das umweltpolitische als auch das wirtschaftspolitische Ziel. Die unterschiedlichen Umwelanforderungen des Gesetzgebers sollten demzufolge nicht zu einer falschen Lenkung der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten bei den Herstellern führen und Maßnahmen sind dabei vom politischen Entscheidungsträger stärker als bisher mit den Planungs- und Entwicklungszyklen der Automobilindustrie in Übereinstimmung zu bringen (Stichwort: Harmonisierung von Umwelanforderungen).

Wie in Kapitel 2 erläutert, ist dem Gesetzgeber in der sehr komplexen Planungssituation zu empfehlen, verschiedene Akteure und unterschiedliche Rahmenbedingungen der natürlichen Umwelt sowie Vorgaben und Restriktionen aus politisch-rechtlicher, technisch-ökonomischer und gesellschaftlicher Sicht zu beachten. Die Automobil- und Zuliefererindustrie ist mit ihrer international herausragenden Wettbewerbsfähigkeit eine tragende Stütze der deutschen und japanischen Exportwirtschaft, zudem bindet sie große Anlagevermögen. Im Gegensatz zu anderen Branchen und entgegen der Entwicklungstendenz der Gesamtwirtschaft verleiht der Fahrzeugbau dem Arbeitsmarkt regelmäßig deutlich positive Impulse. So hängt in Deutschland jeder siebte Arbeitsplatz von der Automobilwirtschaft ab. Gerade diese Schlüsselstellung macht deutlich, wie wichtig es für den politischen Entscheidungsträger ist, wettbewerbsfähige politisch-rechtliche Rahmenbedingungen für die Automobilindustrie zu setzen. Demzufolge kann der politische Entscheidungsträger aus gesamtwirtschaftlichen Gründen kein Interesse daran haben, die jährlichen spezifischen Fahrleistungen mit Hilfe umwelt- und verkehrspolitischer Instrumente zu vermindern. Zur Durchführung anderer Maßnahmen steht der Politik,

wie in Kapitel 3 ausführlich erläutert. eine Palette an umweltpolitischen Anreizinstrumenten zur Verfügung.

Sowohl im deutschen, als auch im japanischen Modell wird in Szenario 1 deutlich, daß sich die Umweltziele bei einer Fortführung der aktuellen Situation (,business-as-usual') nicht verwirklichen lassen. Die Ergebnisse des Szenarios 3 im deutschen Modell zeigen hingegen, daß der politische Entscheidungsträger die Verbreitung alternativer Kraftstoffe (BTL, GTL) fördern sollte, um angesichts der fortschreitenden Verknappung von Ressourcen dauerhaft tragfähige Mobilität zu ermöglichen. In diesem Zusammenhang empfiehlt es sich für den Gesetzgeber, sich nicht auf eine spezielle (Fahrzeug-)technologie festzulegen, sondern allgemein geltende Wirkvorschriften zu erlassen. Die Simulationen zeigen aber auch deutlich, daß für eine dauerhaft tragfähige Reduzierung der Emissionen die Weiterentwicklung der alternativen Antriebstechnologien unbedingt erforderlich ist (Szenario 2). Hierbei wird allerdings auch deutlich, daß allein durch technischen Fortschritt ohne Einsatz politischer Instrumente die umwelt- und verkehrspolitischen Ziele der Emissionsminderung nicht erreicht werden können.

Die Ergebnisse des Szenarios 7 zeigen, daß der politische Entscheidungsträger die automobilbezogenen Steuern so schnell wie möglich von der Hubraumbesteuerung auf eine CO₂-basierte Kraftfahrzeugsteuer umstellen sollte, um kurzfristig die Fahrzeugflotte auf alternative Antriebe umzustellen und eine Reduktion von Emissionen zu erreichen.

Wie Szenario 9 beweist, ist die Einführung einer Maluszahlung für Dieselfahrzeuge ohne Partikelfilter sinnvoll und bewirkt eine rasche Senkung der Partikelemissionen, da infolge dieser Steuer eine zügige Nachrüstung von Filtern bei den entsprechenden Dieselfahrzeugen erfolgt. Falls das Fahrzeug sich nicht mehr umrüsten läßt, fördert die Maluszahlung den Kauf eines umweltfreundlicheren Neufahrzeugs. Die beste Lenkungswirkung läßt sich durch die kaufpreisorientierte Verteilung der Bonus- und Maluszahlungen erreichen. Mit der Erhebung von Bonus- und Maluszahlungen, welche sich am Schadstoffaustoß und dem Verbrauch orientieren, kann der politische Entscheidungsträger den Bestand ökologisch treffsicher steuern und signifikante Emissionsminderungen erreichen. Verschrottungsprämien führen dagegen zu einem schwankenden Abfluß von Altfahrzeugen aus dem Bestand und sind weniger empfehlenswert.

Es zeigt sich, daß eine Reduktion der NO_x-Emissionen nur in begrenztem Maße erreicht werden kann. Demzufolge sind vor allem bei Fahrzeugen mit Dieselmotor zusätzliche Maßnahmen hinaus erforderlich. Eine entsprechende Abgasnachbehandlung stellt die in Entwicklung befindliche Selektive Katalytische Reduktion (SCR) mit einer wässrigen Harnstofflösung (NH₃) als Reduktionsmittel dar, welche bereits für einige Fahrzeuge der Oberklasse unter dem Namen ,AdBlue' vorgestellt worden ist. Hierzu ist die Harnstofflösung als zusätzlicher Betriebsstoff einzuführen und in der bestehenden Tankstelleninfrastruktur zur Verfügung zu

stellen. Die Kombination aus Otto- und Dieselmotor (Homogenous Charge compressions Ignition, HCCI oder Combined Combustion System CCS) ist eine weitere Option zur Reduktion von Stickoxiden (und Partikelemissionen). Die sich im Versuchsstadium befindliche Technik basiert auf einem intelligenten Schichtladeverfahren und einer kontrollierten ‚kalten‘ Verbrennung, aus der sich die niedrigen NO_x-Emissionen erklären.

Wie die Ergebnisse im japanischen Modell zeigen, hat sich das im Jahr 2001 eingeführte ‚Green Tax System‘ mit seinen nach der Höhe der Emissionen gestaffelten Ermäßigungen bewährt (Szenario 1). Mit einem solchen Steueranreizsystem gelingt es dem japanischen Gesetzgeber, schrittweise die ‚herkömmlichen‘ Benzinfahrzeuge durch umweltfreundliche Fahrzeugtypen (‚Low Emission Vehicles‘) zu ersetzen und damit die Emissionen zu senken. Die weitere Verschärfung des Steueranreizsystems beeinflusst die Ausgaben für die Förderung umweltfreundlicher Benzinfahrzeuge, die Emissionen verringern sich nur geringfügig.

Wie Szenario 4 beweist, kann der Gesetzgeber mit der Einführung einer Ökosteuer nach deutschem Vorbild die Verbreitung verbrauchsarmer Fahrzeuge fördern und damit bei konstanten Fahrleistungen implizit die Emissionen – insbesondere das an den Kraftstoffverbrauch gekoppelte Kohlendioxid – senken. Im Hinblick auf die Vorgaben des Kyoto-Protokolls ist die Ökosteuer dabei eine geeignete Maßnahme, die Zielgrößen kurzfristig zu beeinflussen. Langfristig wirkt auch die Verbrauchssteuer nicht auf eine Substitution der konventionellen Antriebstechnologien durch alternative Antriebe (‚Clean Energy Vehicles‘).

Wie Szenario 2 beweist, ist die Weiterentwicklung der alternativen Antriebstechnologien (Hybrid-, Erdgas, Elektro- bzw. Brennstoffzellenfahrzeuge) erforderlich, um damit eine dauerhaft tragfähige Reduzierung der Emissionen zu erreichen. Neben der finanziellen Förderung im ‚Green Tax System‘ ist dabei die Weiterentwicklung der Fahrzeugattribute notwendig – im Modell berücksichtigt durch die nichtlineare Angleichung. Infolge einer Verbesserung der Fahrzeugattribute ‚Reichweite‘ und ‚Motorleistung‘ setzen sich besonders die Erdgas- und Elektrofahrzeuge (Akkumulator und Brennstoffzelle) weiter durch. Voraussetzung für eine beschleunigte Marktdurchdringung ist jedoch eine – durch die Ökosteuer finanzierte – flankierende Förderung von alternativen Antrieben sowie der Aufbau einer geeigneten Tankstelleninfrastruktur.

Die Ergebnisse des Szenarios 5 zeigen, daß die Kombination aus Weiterentwicklung der Fahrzeugattribute – insbesondere einer Verbesserung der im Moment noch nachteiligen Fahrzeugattribute alternativer Antriebe – mit dem obengenannten Einsatz von umweltpolitischen Instrumenten, dem politisch Handelnden ein Werkzeug in die Hand gibt, um die Emissionen des Individualverkehrs dauerhaft zu senken. Die Einführung eines Steueranreizsystems fördert die beschleunigte Verbreitung von umweltfreundlichen Fahrzeugen.

Eine wettbewerbs- und wachstumsfreundliche Politik setzt voraus, daß die Wirkungsweise von politischen Maßnahmen auf die automobilen Wertschöpfung mit Hilfe einer effizienten Gesetzesfolgenabschätzung besser dokumentiert und analysiert wird. Eine solches ‚Impact

Assessment' sollte nicht von den politischen Entscheidungsträgern, sondern von einer unabhängigen Institution durchgeführt werden. Das System zur Entscheidungsunterstützung sollte mit transparenten Kriterien operieren und in der Lage sein, alternative Möglichkeiten durchzuspielen und damit zu einer bürgerfreundlicheren Gesetzgebung führen.

In diesem Zusammenhang sollte die Politik Märkte für Bildung und Forschung schaffen, um Wettbewerb zu stärken und Kooperationen zu initiieren. Hierzu gehört auch die Unterstützung von technologieorientierten Unternehmensgründungen, so daß überlegene Technologien möglichst schnell ihre Wirkung in der Wertschöpfung entfalten. Der neutralen öffentlichen Forschungsförderung kommt vor allem wegen der Ungewißheit unternehmerischer Verwertbarkeit neuen Wissens eine tragende Rolle zu. Dabei ist öffentliche Forschung eng mit der Hochschulbildung und damit der wichtigen Nachwuchsförderung verbunden. Staaten wie die USA oder Japan geben im Vergleich zu Deutschland zum Teil deutlich mehr für Forschung und Entwicklung aus. So hat die US-Regierung im Wettstreit um die Entwicklung alternativer Fahrzeugantriebe ein Forschungsbudget für 2005 beschlossen, welches ein Gesamtvolumen von über 200 Millionen US-Dollar für die Hybridfahrzeugentwicklung enthält.

7.2.2 Automobilindustrie

Die unternehmerischen Entscheidungsträger haben die Aufgabe, eine stabile und zufriedenstellende Ertragskraft der von Ihnen geführten Unternehmen herzustellen und diese dauerhaft zu sichern. Zur Schaffung und zur Sicherung der vorgenannten Ziele, die mit denen der sie vertretenen Interessengruppen übereinzustimmen haben, sind unternehmensindividuelle Strategien zu entwickeln. Aus den Strategien sind operative Maßnahmen abzuleiten, mit denen das Hauptziel unternehmerischen Handelns – die Erwirtschaftung von dauerhaften und zufriedenstellenden Überschüssen – erreicht wird. Mit Ausnahme der Entwicklung grundlegend neuer Techniken, mit denen ein Marktteilnehmer eine von ihm selbst gestaltete Vorreiterrolle übernimmt, bilden die gesetzgeberischen Maßnahmen die Leitlinien, nach denen die unternehmerisch Handelnden ihre individuellen Strategien auszurichten haben.

Die Entscheidung des unternehmerisch Handelnden im Sinne seiner Verantwortung muß also sein, die Vorgaben der politisch Handelnden zur Kenntnis zu nehmen und die sich daraus ergebenden Entwicklungen zu antizipieren. Andererseits haben die gesetzlichen Auflagen den vorteilhaften Charakter von Spielregeln, an die sich alle Marktteilnehmer zu halten haben. Innerhalb dieser Regulierungen ist es an dem einzelnen Unternehmen, mit Nachdruck eine konsequente Umweltschutzstrategie voranzutreiben und sich durch Innovationen in Technologien und Systemen einen Wettbewerbsvorsprung zu verschaffen. Hierbei sind die unternehmerischen Entscheidungsträger bei den Fragen, um die es in der vorliegenden Arbeit geht, nur eingeschränkt in der Lage, die obengenannten politischen Entscheidungsträger im Sinne der unternehmensindividuellen Strategie zu beeinflussen. Eine Einflußnahme auf künftige Technologien erfolgt im Allgemeinen durch Industrieverbände. Deren Empfehlungen werden,

soweit sie den politischen Interessen nicht zuwiderlaufen, regelmäßig bei den gesetzgeberischen Maßnahmen berücksichtigt.

Deutschland und Japan haben auf ihren Märkten die anspruchsvollsten Umweltziele der Welt formuliert und der Automobilindustrie damit einen entscheidenden Anstoß bei Innovationen geliefert. Die Automobilindustrie sollte sich den Herausforderungen, die der Gesetzgeber vorgibt, stellen und das Thema Ökologie als ein Mittel zur Differenzierung weiter vorantreiben. Langfristig führt eine solche Strategie zu einem Wettbewerbsvorteil – insbesondere wenn die Nachfrage nach sparsameren und umweltfreundlicheren Fahrzeugen in Nordamerika anhält und sich in dieser Form auch in Asien in dieser Form entwickelt. So sollte die Automobilindustrie auch neue Geschäftsmodelle einführen, wie zum Beispiel ein Öko-Zusatzfahrzeug, und Kaufhemmnisse abbauen durch sogenannte ‚Sub-Brands‘, Umweltkennzeichen oder Fahrzeugtauschaktionen.

Die Automobilindustrie zieht einen Nutzen aus der Umstellung von der hubraum- auf eine CO₂-basierte Kfz-Steuer, da der Kunde – wie unter 7.2.1 erwähnt – die Betriebskosten seines Fahrzeugs nach Möglichkeit vermindern will und dies am besten durch den Kauf eines neuen umweltfreundlichen Fahrzeugs erreicht. Unter der Voraussetzung, daß es sich um Wirkvorschriften und keine Bauvorschriften handelt, profitieren die Hersteller auch von Bonuszahlungen sowie von Verschrottungsprämien, da sie den Absatz von umweltfreundlichen Neufahrzeugen fördern. Um nachteilige Maluszahlungen zu vermeiden, sollte der Hersteller seine Fahrzeugpalette entsprechend anpassen. Viele Regelungen sind jedoch widersprüchlich. So erfordern – wie gesagt – Auflagen zur aktiven und passiven Sicherheit ein höheres Fahrzeuggewicht und bedingen damit höhere CO₂-Emissionen. Bei der Einführung neuer Vorschriften müssen derartige Zielkonflikte gemeinsam mit dem politischen Entscheidungsträger diskutiert und – unter Berücksichtigung der spezifischen Produktzyklen – ein ausreichender zeitlicher Vorlauf vereinbart werden.

Den zunehmenden umwelt- und verkehrspolitischen Anforderungen können Unternehmen letztlich nur durch weitere Aufwendungen in Forschung und Entwicklung begegnen (z.B. GTL/ BTL), um so die im Moment noch nachteiligen Fahrzeugattribute weiterzuentwickeln. Neben der Elektronik- und Softwareentwicklung sowie der Werkstofftechnologie zeichnen sich die größten Innovationen im Bereich der Antriebstechnologie ab. Um hohe Rohemissionen – speziell Stickoxide – beim Dieselmotor zu reduzieren, sollte die Industrie weiter intensiv an sinnvollen Alternativen forschen. Dabei wird es nicht ‚ein‘ Auto der Zukunft geben, sondern eine Vielfalt unterschiedlicher Modelle und Fahrzeugkonzepte für voneinander abweichende Kundenanforderungen. Die Kundenwünsche sollten dabei vom Hersteller mehr als bisher berücksichtigt werden.

Schließlich bestehen in der Automobilindustrie zum Teil erhebliche Mängel in der quantitativen Bewertung umwelt- und verkehrspolitischer Regulierungen. Um Fragen nach Zielvereinbarungen, der Strategie, der Marktanalyse und der Regelung nachfolgender Prozesse zu lösen,

ist die Einführung einer effizienten Politikfolgenabschätzung für Automobilhersteller unabdingbar. Nur mit Hilfe von geeigneten Systemen zur Entscheidungsunterstützung kann der Hersteller frühzeitig antizipieren, wie sich komplexe ordnungspolitische Anforderungen auf das Produktportfolio auswirken. Enge und effiziente Kooperationen zwischen Wirtschaft und Wissenschaft sind dabei notwendig.

7.2.3 Kunden

Die Lösung technischer Anforderungen durch die Automobilindustrie ist notwendig, aber nicht hinreichend. Entscheidend für den Durchbruch umweltfreundlicher Mobilität ist letztlich die Bereitschaft des Kunden, ein neues umweltfreundliches Produkt zu kaufen. Mangelnde Kundenakzeptanz hat in der Vergangenheit die Verbreitung von alternativen Technologien im Automobilbereich stark verlangsamt oder ganz verhindert (z.B. Flüssiggas, Methanol, Erdgas, Biodiesel). Für den Kunden stehen die Anschaffungs- und Betriebskosten eines Fahrzeugs im Mittelpunkt, aber auch Komfort, Image, Größe, Hubraum und Leistung sind wichtige Faktoren bei der Kaufentscheidung – zumindest für diejenigen, die es sich leisten können. Auch Umweltverträglichkeit spielt für den Kunden in gesättigten Märkten wie Deutschland und Japan eine zunehmend wichtige Rolle; sie ist zu einem der wichtigsten Kaufkriterien aufgestiegen.

Der Kunde sollte ökologische, technisch-ökonomische, politisch-rechtliche und gesellschaftliche Rahmenbedingungen antizipieren und beim Kauf eines Neuwagens berücksichtigen. Hierbei sollte sich der Käufer eines Fahrzeugs frühzeitig über Kraftstoffpreise, Umweltzonen etc. informieren, um auf diese Weise von Anreizsystemen zu profitieren und Maluszahlungen zu vermeiden.

Die zum Teil schwache reale Einkommensentwicklung in der sogenannten Mittelschicht – sowohl in Deutschland als auch in Japan – erschwert die Anschaffung langlebiger Gebrauchsgüter für viele Kunden. Es kommt auf den reiferen Märkten zu einer wachsenden Konkurrenz der Bedürfnisse. Der Neuwagenkauf wird zunächst zurückgestellt, umweltfreundliche Fahrzeuge setzen sich nur schrittweise durch, das insgesamt zögerliche Konsumverhalten verstärkt sich. Dem Kunden ist demzufolge zu empfehlen, die Gesamtkosten einer Fahrzeuginvestition, welche über ihren kompletten Lebenszyklus hinweg anfallen (Total-Cost-of-Ownership), genau zu antizipieren. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die zunehmende Bedeutung der Betriebskosten („Owning Cost“) für die Kaufentscheidung. Neben dem Kraftstoffverbrauch, den Wartungs- und Reparaturkosten sowie der Autoversicherung betrifft dies insbesondere die Kraftfahrzeugsteuer. Eine CO₂-basierte Kfz-Steuer – in Verbindung mit aller Voraussicht nach weiter steigenden Kraftstoffpreisen – sollte den Kunden zum Kauf von umweltfreundlicheren Fahrzeugen ermutigen.

Doch die aktuelle Zurückhaltung beim Autokauf hat nicht nur finanzielle Gründe. Viele Kunden sind durch die Diskussion über konkurrierende Umwelttechnologien und unterschiedliche

Umweltziele sehr verunsichert und sehen sich nicht in der Lage, anhand technischer Daten selbst zu beurteilen, ob ein Fahrzeug umweltfreundlich ist oder nicht. Eine solche Beurteilung und die daraus abzuleitende Kaufentscheidung hat Folgen: Der Käufer weiß dann, ob er in Zukunft noch mit seinem Fahrzeug in die Innenstadt fahren darf oder nicht (Stichwort: Innenstadtspernung), ob das Fahrzeug alternative Kraftstoffe – und wenn ja – in welcher Menge verträgt, ob es strikten Umweltgesetzen (z.B. NO_x) genügt, ob er möglicherweise zur Zahlung von Bußgeldern verpflichtet werden kann oder ob das Fahrzeug auch nach einigen Jahren noch einen angemessenen Wiederverkaufswert hat. Eine neutrale Institution kann beispielsweise mit Hilfe von grünen Umweltplaketten Hilfestellung bei Kaufentscheidungen leisten. Mit Hilfe solcher Umweltkennzeichen kann sich der Kunde leichter orientieren.

Schließlich bieten sich für den Kunden regelmäßige Fahrschulungen an, um eine schadstoffarme und kraftstoffeffiziente Nutzung des Fahrzeugs sicherzustellen.

7.2.4 Wissenschaft

Die aufgezeigten Schwachstellen in der Bewertung von Gesetzesfolgen im Individualverkehr haben gezeigt, daß weiterer Forschungsbedarf in der Festlegung und Umsetzung umweltrechtlicher Maßnahmen besteht. Nach gegenwärtigem Erkenntnisstand sind Auswirkungen nur für bedeutende Maßnahmen mit Hilfe makro- und mikroökonomischer Modelle zu ermitteln. Die Reaktion der betrieblichen Entscheidungsträger und die konkreten stofffluß- und finanzbasierten Auswirkungen entlang der Wertschöpfungskette finden in den derzeit eingesetzten Verfahren nur ungenügend Berücksichtigung. Die ökologische Treffsicherheit und ökonomische Effizienz der rechtlichen Maßnahmen ist gewährleistet.

Es ist daher eine erweiterte Gesetzesfolgenabschätzung notwendig, die die betrieblichen Entscheidungsträger sowie die zwischen diesen bestehenden physischen und finanziellen Verknüpfungen explizit berücksichtigt. Von einem derartigen erweiterten Konzept der Gesetzesfolgenabschätzung lassen sich die folgenden Ansprüche ableiten:

- Weitere Abbildung der Ursache-Wirkungs-Beziehungen unter Berücksichtigung von Rückkopplungen auf sozioökonomischer Ebene
- Modellierung der Reaktion betrieblicher Entscheidungsträger und der stoffflußorientierten Auswirkungen politischer Optionen auf betrieblicher Ebene
- Verknüpfung der einzelnen Prozesse und Akteure mit dem Ziel der Abbildung und Bewertung physischer und finanzieller Interdependenzen

Darauf aufbauend eignet sich die Verknüpfung der sozioökonomischen und der betriebswirtschaftlichen Modellierungsebene über Top-Down- und Bottom-up-Verfahren, um Annahmen auf der aggregierten Ebene durch Ergebnisse der detaillierteren Ebene zu bestätigen oder zu widerlegen sowie Reaktionen der detaillierteren Ebene auf der aggregierteren Ebene mit dem Ziel zu nutzen, daraus wiederum Handlungsempfehlungen an Entscheidungsträger beider Ebenen abzuleiten.

7.3 Ausblick

Individuelle Mobilität ist Ausdruck von Selbstbestimmung und Flexibilität – Werte, die in der heutigen Gesellschaft eine immer wichtigere Rolle spielen. Neue und kreative Lösungen sind erforderlich, um den Individualverkehr dauerhaft tragfähig zu organisieren. Die hierfür eingesetzte Politikfolgenabschätzung verfolgt das Ziel der ex-ante Verbesserung und Vereinfachung umwelt- und verkehrspolitischer Maßnahmen mit Hilfe eines Werkzeugs zur Entscheidungsunterstützung. Eine Modellerweiterung erscheint hinsichtlich der Systemgrenzen sinnvoll.

So sollte der Einfluß der Kraftstoffpreise und das Problem der Rohstoffverknappung mit Hilfe eines Sub-Modells noch besser abgebildet werden. Die zukünftige Entwicklung der Kosten für Mobilität ist eine wesentliche Determinante für die PKW-Nachfrage. Die Kraftstoffpreise bestimmen sich dabei maßgeblich durch die Steuern und Rohölpreise. Die massive Preissteigerung ist insbesondere auf ein starkes Wirtschaftswachstum in den letzten Jahren und einen vergleichsweise unzureichenden Ausbau der Ölgewinnungskapazitäten – insbesondere in den OPEC-Ländern – zurückzuführen. Zu physischen Versorgungsstörungen kam es zwar nicht, die Reservekapazitäten in der Ölindustrie sind allerdings auf ein sehr niedriges Niveau gesunken. Angesichts der politischen Unsicherheiten in vielen Ölförderländern hat die Entwicklung dazu beigetragen, daß in die Preise für Rohöl und Mineralölprodukte eine steigende Risikoprämie ‚einkalkuliert‘ worden ist. Diese Steigerung wird sich weiter fortsetzen. Bei Preisen von über 60 US-Dollar je Barrel ist die Steigerung der Ausbeute rate auf den Ölfeldern und eine Vielzahl von Alternativen zum konventionellen Erdöl (z.B. BTL, GTL) wirtschaftlich. Das Thema ‚Rohstoffsicherheit‘ stellt sowohl für politische als auch für unternehmerische Entscheidungsträger eine wichtige Erweiterung des Modells dar.

Die Stickoxide sind ein kritischer Punkt beim Dieselantrieb im Hinblick auf die Anforderungen der Schadstoffklassen EURO 5 und EURO 6. Der Speicherkatalysator allein ist nicht ausreichend. Einen möglichen Ansatzpunkt zur Weiterentwicklung der Simulationsmodelle dieser Arbeit stellt die Integration des Systems ‚Adblue‘ dar, basierend auf der Struktur der Partikelfilterintegration.

Eine zusätzliche Erweiterung des verwendeten Modells wäre die im Zeitverlauf unterschiedliche Gewichtung von Käuferpräferenzen, so daß zum Beispiel Motorleistung und erzielbare Reichweite bei der Kaufentscheidung im Laufe der Simulation eine andere Gewichtung erfahren. So sollte es im Modell auch möglich sein, (vermeintlich) ‚irrationales Kaufverhalten‘ zu simulieren, also zu untersuchen, inwieweit – neben dem rein ökonomischen Kalkül des ‚Homo Oeconomicus‘ – menschliche Konsumententscheidungen auch von Gefühlen wie Neid, Altruismus oder von der Erwartung eines gerechten Verhältnisses zwischen Leistung und Gegenleistung (Reziprozität) geprägt sind. Ein Beispiel wäre die zu beobachtende Beliebtheit der leistungsstarken, sportlichen Geländewagen (SUV) trotz deren gleichbleibend hohen An-

schaffungs- und Betriebskosten. In diesem Zusammenhang dürften auch Kooperationen mit Marketingexperten, Psychologen und ‚Neuroökonom‘ hilfreich sein. So kann in einer Modellerweiterung die Orientierungsfunktion von ‚Marken‘ ebenfalls berücksichtigt werden. Jeder neue Kaufanreiz trifft dabei auf fest verschaltete neuronale Netze; erweist sich der Reiz als nicht wichtig, läuft er als Fehlassociation ins Leere.

Die PKW-Nachfrage bestimmt sich insbesondere durch die Zahl und die Struktur der Haushalte, wobei der private Verbrauch auch davon abhängt, in welcher Phase des Lebenszyklus sich der Haushalt befindet und wie er sich zusammensetzt. Haushalte mit Kindern fragen andere Güter und Dienste nach als Haushalte junger Alleinlebender oder älterer Paare. Auf diese Weise lassen sich auch demographische Entwicklungen in das Modell integrieren.

Ein weiterer Ansatzpunkt für zukünftige Modellerweiterungen ist die Wirkungsabschätzung weiterer politischer Instrumente, beispielsweise Design- und Fußgängerschutz, Zersiedelung von Landschaften durch Entfernungspauschalen, Sicherheitsanforderungen. Hierbei könnte eine Optimierung mit unterschiedlichen Kriterien durch weitere Regelungskreise erfolgen, um beispielsweise eine bestimmte Fahrzeugbestandsverteilung oder ein bestimmtes Emissionsziel bei minimalem Förderungseinsatz zu erreichen.

Die Berücksichtigung von ‚Rebound‘-Effekten stellt einen weiteren möglichen Ansatzpunkt zur Erweiterung des in dieser Arbeit erstellten Simulationsmodells dar. Diese Effekte lösen eine quantitativ veränderte Entwicklung des Gesamtfahrzeugbestandes mit entsprechenden Auswirkungen auf die gesamten Emissionsbelastungen aus, bedingt durch den Einfluß von veränderten Fahrzeugeigenschaften und Kostenstrukturen. Bei gesättigten und sich (nur) qualitativ verändernden Märkten in Deutschland, Japan und den USA spielt die Erweiterung zwar eine nachrangige Rolle, bei der Untersuchung von wachsenden Märkten in Ostasien, Indien und Rußlands ist die Berücksichtigung derartiger Effekte jedoch unumgänglich.

Um Lösungswege bei der Schadstoff- und CO₂-Minderung aufzuzeigen, sind in einem erweiterten Modell maßgebliche Glieder der Mobilitätskette zu berücksichtigen, beginnend bei den im vorliegenden Modell untersuchten Kraftstoffen und Fahrzeugen bis hin zum Verhalten der Fahrzeugnutzer (z.B. Schaltzeitpunktanzeigen) und der Verkehrsinfrastruktur (z.B. Ampelschaltungen, intelligente Verkehrsleitsysteme). Hierbei ist festzustellen, daß sich der Individualverkehr nicht vom Schienen-, Schiffs- und Luftverkehr abkoppeln läßt.

8 Zusammenfassung

Das individuell und flexibel einsetzbare Automobil und die darauf ausgerichtete Verkehrsinfrastruktur haben eine hohe Bedeutung für den wirtschaftlichen und kulturellen Fortschritt. Der Erfolg des Automobils als volkswirtschaftliche Schlüsselindustrie wird jedoch durch einen hohen Verbrauch von Energie und anderen Umweltressourcen erkauft – die Massenmotorisierung ist im lokalen und überregionalen Maßstab an vielen ökologischen Brennpunkten beteiligt.

Vor dem Hintergrund steigender Abgas- und Treibhausgasemissionen greift der Gesetzgeber daher auf nationaler und internationaler Ebene in vielfacher Form lenkend in die Entwicklung des Individualverkehrs ein. Der Einsatz von sowohl ordnungspolitischen als auch ökonomischen Instrumenten der Umwelt- und Verkehrspolitik wird die Planungsgrundlage der international tätigen Automobilunternehmen zunehmend beeinflussen. Die künftige Wettbewerbsfähigkeit der Hersteller hängt in entscheidendem Maße von der dauerhaft tragfähigen Ausrichtung des Produktportfolios ab.

Vor diesem Hintergrund erfolgt in der vorliegenden Arbeit die Konzeption eines rechnergestützten Planungssystems zur Gestaltung und Bewertung von Politikoptionen im dauerhaft tragfähigen Individualverkehr. Der Fokus wird hierbei auf den Einsatz umweltfreundlicher Antriebstechnologien und Kraftstoffe gelegt.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht in der Analyse der Auswirkungen umweltpolitischer Instrumente auf das Verkehrssystem und in der Gestaltung und Bewertung von Politikoptionen zur Reaktion auf und Antizipation von bevorstehenden Veränderungen. Hierfür sind Potentiale und Handlungsempfehlungen für politisch Handelnde abzuleiten sowie weitergehend Erkenntnisse für unternehmerische Entscheidungsträger aufzuzeigen.

Dazu erfolgt in einem ersten Schritt eine Analyse der natürlichen, technisch-ökonomischen, politisch-rechtlichen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen des Individualverkehrs. Dabei zeigt sich, daß sich – trotz bestehender nationaler und internationaler Emissionsgrenzwerte und Verbrauchsnormen – die Emissionssituation mit zunehmendem Mobilitätsgrad weiter verschärft. Da sowohl politische als auch betriebliche Entscheidungsträger nur eingeschränkte Möglichkeiten haben, auf den Mobilitätsgrad und die Fahrleistungen der Konsumenten einzuwirken und dies aus wirtschaftlichen Gründen auch nicht wollen, stehen Maßnahmen zur Förderung neuer Techniken im Mittelpunkt. Der Schwerpunkt der Analyse liegt auf Deutschland und Japan (siehe Kapitel 2).

Neben der Analyse des Planungsumfeldes im Individualverkehr werden im Rahmen einer Instrumentenanalyse die zur Verfügung stehenden umweltpolitischen Werkzeuge untersucht, wobei zwischen ordnungsrechtlichen und ökonomischen Instrumenten unterschieden wird. Dies erlaubt Rückschlüsse auf ökologische Treffsicherheit, ökonomische Effizienz und dynamische Anreizwirkung politischer Werkzeuge. Durch die zum Teil neuen Instrumente wird

den politisch und unternehmerisch Handelnden die Antizipation der zukünftigen umweltrechtlichen und der sich daraus ergebenden technischen und betriebswirtschaftlichen Veränderungen erschwert. Dies bedingt die Notwendigkeit der Entwicklung eines flexiblen Planungsinstruments, das sowohl dem politischen als auch dem unternehmerischen Entscheidungsträger die Abschätzung der Auswirkungen verschiedener Veränderungen der Unternehmensumwelt erlaubt (siehe Kapitel 3).

Auf Grundlage der durchgeführten Umweltanalyse sowie der Untersuchung von umweltpolitischen Lenkungsinstrumenten erfolgt die Ableitung von Anforderungen an einen Ansatz zur strategischen Gestaltung des Individualverkehrs und der Abschätzung von Gesetzesfolgen. Die erarbeiteten Anforderungen verdeutlichen, daß für die langfristige Planung des Individualverkehrs Rückkopplungsbeziehungen zwischen Stoffstrom- und Finanzmodell berücksichtigt werden müssen. Erst eine Integration der verschiedenen Ansätze auf einer geeigneten Detaillierungsebene erlaubt die Entwicklung eines flexiblen Planungs- und Bewertungsansatzes des Individualverkehrs für politisch und unternehmerisch Handelnde (siehe Kapitel 4).

Aufgrund der Umweltveränderungen und der dadurch bedingten Auswirkungen auf die Stoff- und Finanzströme im Individualverkehr herrscht Planungsunsicherheit für politisch und unternehmerisch Handelnde. Die Entwicklungen von Umweltmaßnahmen lassen sich meist nicht aus Vergangenheitsdaten ableiten. Aus diesem Grund erfolgt im vorliegenden Beitrag der Entwurf eines Werkzeugs zur Entscheidungsunterstützung im Individualverkehr mit Hilfe eines systemkybernetischen Simulationsmodells. Hierfür werden zunächst Transformations- und Transportvorgänge als Treiber der Stoff- und Finanzströme identifiziert. Nach der Ermittlung und qualitativen Bewertung der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen Fahrzeugbeständen, Fahrleistungen, Fahrzeugalterungen, Emissionen und dem für Umweltausgaben zur Verfügung stehende Budget, folgt eine Quantifizierung der Stoffströme. Neben der Veränderung exogener Rahmenbedingungen erfolgt die Wirkungsabschätzung von ökonomischen und ordnungsrechtlichen Instrumenten (siehe Kapitel 5).

Die Anwendung des Gestaltungs- und Bewertungsansatzes auf das Fallbeispiel der Automobilmärkte Deutschland und Japan verdeutlicht die Eignung des Ansatzes für die Bewertung von Politikoptionen. Hierbei können nicht nur gesetzliche Alternativen verglichen werden, sondern es werden auch die Veränderungen externer Rahmenbedingungen untersucht – etwa signifikante Fahrleistungs- und Kraftstoffpreiserhöhungen, auf die der politisch Handelnde wenig Einfluß hat. Auf Grundlage der vorgestellten Analysen können detaillierte Ergebnisse und Handlungsempfehlungen für die Gestaltung und Entwicklung des Individualverkehrs abgeleitet werden (siehe Kapitel 6).

Das vorgestellte Konzept stellt einen geeigneten sowie am Fallbeispiel validierten Ansatz für die Gestaltung und Bewertung von Politikoptionen im Individualverkehr dar. Hierbei erfolgt die Abschätzung zukünftiger umweltrechtlicher Rahmenbedingungen. Eine Übertragung des Konzeptes ist sowohl auf andere geographische Regionen, als auch auf weitere Branchen

möglich. Sinnvoll erscheint zudem eine Erweiterung der Systemgrenze auf die betriebliche Ebene (siehe Kapitel 7).

Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik bildet die Grundlage für die Gestaltung und Bewertung von Politikoptionen im Individualverkehr. Hiermit steht insbesondere politisch Handelnden ein ausreichend flexibles, stoffstrom- und finanzstrombasiertes strategisches Planungs- und Bewertungskonzept zur Verfügung, welches langfristig und schnell die Durchführung von Szenario- und Sensitivitätsanalysen im Rahmen gemeinsamer Entscheidungen im Individualverkehr erlaubt. Die vorliegende Arbeit liefert daher einen relevanten Beitrag zur Bewertung der politisch-rechtlichen und technisch-ökonomischen Auswirkungen der durch umweltpolitische Lenkungsinstrumente bedingten Veränderungen im Individualverkehr. Das erlaubt dem Gesetzgeber eine effizientere Umsetzung von dauerhaft tragfähigen, Gesetzesinitiativen und dem unternehmerisch Handelnden die Antizipation von umweltpolitischen Rahmenbedingungen, um sein Produktportfolio frühzeitig danach auszurichten.

Literatur

ACEA (2001): Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA): Diesel Communication and Education Strategy, 19.06.2001.

ACEA (2002): Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA) WG Diesel Communication, Draft Paper of the Subgroup 1, Diesel Emissions and Fuels, 18.12.2002.

ACEA (2002a): Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA), Subject: Japanese/ US Activities towards the new Chinese Certification System (China No. 63), ACEA ref.: 20021118, 30.07.2002.

ACEA (2003a): Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA), Selective Catalyst Reduction (SCR), 10.03.2003.

ACEA (2003b): Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA), European Parliament – 2nd reading vote on Greenhouse Gas Emission Allowance Trading. ACEA ref. : 20031159, 16.07.2003.

ACEA (2004a): Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA), Subject: Japan monthly report, ACEA ref.: 20042561, 13.12.2004.

ACEA (2004b): Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA), Subject: Upcoming revision of Japan's fuel efficiency target, ACEA ref.: 20042492, 2.12.2004.

ACEA (2004c): Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA), Subject: Japan, status report on car-related CO₂-reductions, ACEA ref.: 20041615, 23.07.2004.

ACEA (2004d): Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA), Subject: Japan TBT Notification (JPN/126), ACEA ref.: 20041598, 20.07.2004.

ACEA (2004e): Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA), Subject: Potential new fuel economy standard for 2015 in Japan, ACEA ref.: 20041259, 3.06.2004.

ACEA (2004f): Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA), Subject: Organisation of a Diesel Seminar in Tokyo, ACEA ref.: 20040629, 16.03.2004.

ACEA (2005a): Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA), Subject: Overview of tax incentives for hybrids (September 2005 update), ACEA ref.: 20051879, 27.09.2005.

ACEA (2005b): Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA), Subject: Japan: CO₂ Reductions, ACEA ref.: 20050744, 11.04.2005.

ACEA (2005c): Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA), Subject: Minutes of the 1st Fuel Efficiency WG meeting of JAIA, ACEA ref.: 20050679, 4.04.2005.

ACEA (2005d): Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA), Subject: Japan monthly report – January 2005, ACEA ref.: 20050286, 4.02.2005.

ADAC (2004a): Allgemeiner Deutscher Automobilclub (ADAC) e.V. ADAC-Motorwelt, Heft 12, Dezember 2004. München: ADAC Verlag, 2004.

ADAC (2004b): Allgemeiner Deutscher Automobilclub (ADAC) e.V., ADAC-Konzept zur Reform der Kfz-Steuer. Dezember 2004.

ADAC (2004c): Allgemeiner Deutscher Automobilclub (ADAC) e.V., Allgemeiner Deutscher Automobilclub (ADAC) e.V.: Informationen aus der Fahrzeugtechnik. Gebrauchtwagenpreise Herbst/Winter 2004/2005. München: Internet, 2004. www.adac.de, abgerufen am 30.01.2005.

Afflerbach, G. (2006): E-Mail vom 6.04.2006 (TÜV-Nord)

AGQM (2005): Arbeitsgemeinschaft Qualitätsmanagement Biodiesel e.V. (AGQM): Biodiesel – Sicher und sauber. Berlin: Internet, 2005. <http://www.agqm-biodiesel.de>, abgerufen am 24.01.2005.

AIRA (2004): Automobile Inspection & Registration Association (AIRA): <http://www.aira.or.jp/index.html>, Japan; Datei: Fahrzeugbestand Japan (PKW).

Albrecht 2005: ADAC-Konzept zur Reform der Kfz-Steuer, Verkehrspolitik und Verbraucherschutz. Allgemeiner Deutscher Automobilclub (ADAC) e.V., München. (04-12_ADAC_Kfz-Steuer_Zusammenfassung.pdf)

Almquist, E., Kon, M., Bock, W. (2003): Economic's Gift to Marketing – Understanding Demand before it's too late. In: Mercer Management Journal, Ausgabe 15, Internet.

Altmann, J. (1997): Umweltpolitik: Daten, Fakten, Konzepte für die Praxis. Lucius&Lucius Verlag, Stuttgart.

AMS (2005a): Abgasproblem – Folz fordert Verschrottungsprämie. In: Auto, Motor und Sport (AMS), 23.06.2003.

AMS (2005b): Rußfilter – Förderungspaket geschnürt. In Auto, Motor und Sport (AMS), 27.04.2005.

AMS (2005c): Feinstaub – Bund ebnet den Weg für Fahrverbote. In Auto, Motor und Sport (AMS), 23.04.2005.

AMS (2005d): Geld-Fieber – Wolken über dem Hoffungsmarkt China. In Auto, Motor und Sport (AMS), 19.01.2004.

Anderson, S. P., de Palma, A., Thies, J.-F. (2001): Discrete Choice Theory of Product Differentiation. MIT-Press, Cambridge, London.

Aral (2005a): Aral Aktiengesellschaft: Aral Forschung: Kraftstoffpreise im Detail. Preisbildung und -struktur. Bochum, Internet: http://www.aral.de/struktur/inside.cfm?si_id=652, abgerufen am 11.01.2005.

Aral (2005b): Aral Aktiengesellschaft: Aral Forschung: Kraftstoffe. Bochum, Internet: <http://aral-forschung.de/forschung/homepage/kraftstoffe.html>, abgerufen am 27.02.2005.

Aral (2006a): Aral Homepage: Kraftstoffpreise im Detail – Preisbildung und Struktur. Internet, 2006. http://www.aral.de/struktur/inside.cfm?si_id=651, abgerufen am 06.02.2006.

Aral (2006b): Aral Homepage: Ultimate Kraft- und Schmierstoffe. Internet, 2006. http://www.aral.de/struktur/inside.cfm?si_id=10951eer, abgerufen am 06.02.2006.

Armstrong, J. S. (2001): Principles of forecasting – A handbook for researchers and practitioners. Kluwer. Boston (Mass.).

Arthur D. Little (2003): Investigation of the Consequences of Meeting a New Car Fleet Target of 120g/km CO₂ by 2012 – Final Report. Presentation to the EU commission, 1.10.2003.

AT (2005): Automotive Technology: Sign of Diesel Revival in Japan? In: Automotive Technology, p. 126-139.

AUDI (2005): CO₂-basierte Besteuerung, I/GP-R, 2.06.2005.

AutoEntw (2004): Automobil Entwicklung: Saubere Flotte mit Gas-To-Liquids, Ausgabe Januar 2004. Verlag Moderne Industrie, Landsberg.

Automobilindustrie (2007): USA – Der Dieselmotor nimmt Fahrt auf. In: Automobilindustrie 07/ 2007.

Automobilproduktion (2005): Toyota und die Macht der Nische – Hybride nehmen Fahrt auf. Interview mit Toyota Europe Executive Vice President Kazuhiko Miyadera. In: Automobilproduktion 05/ 2005.

Automobilproduktion (2006): Auf Dauer mehr E-Power – Der Antriebsstrang der Zukunft. Interview mit BMW-Entwicklungsvorstand Prof. Dr. Burkhard Göschel. In: Automobilproduktion 09/ 2006.

Automobilproduktion (2007): Zwischen Otto und Diesel. In: Automobilproduktion 10/2007.

Automobilwoche (2007): Gesucht – sauber und sparsam. In: Automobilwoche, 10.09.2007.

Automotive News Europe 2004: 2004 Global Market Data Book: Japan sales history and forecast. Automotive Europe News Europe; Datei: Automotive News Europe.

Avadikyan, A.; Patrick, C.; Héraud, J.-A. (2003): The Economic Dynamics of Fuel Cell Technologies. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, NewYork.

AW Knowledge (2004): Automotive World Knowledge: Toyota Prius hybrid engine voted the world's best, by AWKnowledge staff writer, 1.07.2004.

AW Knowledge (2005a): Automotive World Knowledge: Hybrid versus diesel is pointless argument, Masatami Takimoto (Toyota) at Motorsymposium in Vienna 2005, by AW Knowledge, 26.05.2005.

AW Knowledge (2005b): Automotive World Knowledge: Beijing adopts new pollution measures, AWKnowledge staff writer (Region China), 7.04.2005.

AW Knowledge (2005c): UK environmental labelling – courting the green car buyer, Paul Nieuwenhuis, 1.03.2005.

Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R. (2000): Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung, 9. Aufl., Springer-Verlag, Berlin.

Bady, R.; Renner, C. (2005): Institut für Kraftfahrtwesen Aachen (IKA): Fachartikel zu Elektrofahrzeugentwicklungen. In Japan, USA und Europa. Aachen: RWTH Aachen, 2005. http://www.gbt.ch/_forum/00000277.htm, abgerufen am 16.01.2005.

Baetge, J. (1974): Betriebswirtschaftliche Systemtheorie: Regelungstheoretische Planungsüberwachungsmodelle für Produktion, Lagerung und Absatz. Westdeutscher Verlag, Opladen.

Bähr-Seppelfricke, U. (1999): Diffusion neuer Produkte – Der Einfluß von Produkteigenschaften. Deutscher-Universitäts-Verlag, Wiesbaden.

Ball, J. (2004): China talks up its ‚green‘ agenda. In: Wall Street Journal Europe, 16.12.2004.

Ball, J.; Fialka, J. (2004): Auto makers file Suit to block california's law on emissions. In: Wall Street Journal – Online, 2.12.2004, S. D7.

Ball, J.; White, J.B. (2005): Big Question for Big Three: Will Gas Prices doom SUVs. In: Wall Street Journal Europe, 22.03.2005.

Bamberg, G.; Coenenberg, A. G. (2002): Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre, 11. Aufl., in: WISO-Kurzlehrbücher Reihe Betriebswirtschaft. Verlag Vahlen. München.

- Bank, M. (2000):** Basiswissen Umwelttechnik, 4. Aufl.. Vogel Buchverlag, Würzburg.
- Barlas, Y. (1996):** Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. In: System Dynamics Review, Bd. 12, Nr. 3, John Wiley & Sons. New York (NY), S. 183-210.
- Barske, H. (2004):** Die große Chance des Hybrid. In Süddeutsche Zeitung, 2.06.2004.
- Barth, H. (1974):** Prognoseverfahren in den Sozialwissenschaften – Eine ordnende Zusammenfassung der Methoden und Probleme. Berlin, Technische Universität Berlin.
- Bartsch, C (2004):** Die Zukunft der synthetischen Kraftstoffe hat schon begonnen. In: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 13.07.2004, Frankfurt am Main.
- Bauer (2004):** Bauer Verlagsgruppe: Verbraucheranalyse 2004 – Codeplan. Axel Springer Verlag AG, Hamburg.
- Baumol, W. J.; Oates, W.E. (1988):** The Theory of Environmental Policy. 2. Aufl., Cambridge (MA).
- Behlmer, A., Wanke, D. (2003):** Der Saft der Zukunft, Automobil Industrie, Ausgabe 12/03. Vogel-Verlag, Würzburg.
- Behrens, A. (1990):** Das Rohstoffversorgungsrisiko in offenen Volkswirtschaften. In: Kieler Studien – Institut für Weltwirtschaft an der Universität Kiel. von Horst Siebert, Nr. 239. J.C.B. Mohr, Tübingen.
- Ben-Akiva, M., Lerman, S. R. (1985):** Discrete Choice Analysis – Theory and Application to Travel Demand. The MIT Press, Cambridge (Mass.).
- Ben-Akiva, M. et al. (1997):** Modeling Methods for Discrete Choice Analysis, in: Marketing Letters 8, Heft 3, S. 273-286.
- Ben-Akiva, M., Bierlaire, M. (2003):** Discrete Choice Methods with Application to Departure Time and Route Choice. In: Hall, R.W. (Hrsg.): Handbook of Transportation Science (2. Aufl.), S. 7-37, Kluwer Academic Publishing, Norwell Dordrecht.
- BenDor, T. (2004):** Simulating a Combination of Feebates and Scrappage Incentives to reduce Automobile Emissions. University of Illinois, Department of Urban and Regional Planning, Champaign (Ill.).
- Benkert, W., Bunde, J., Hansjürgens, B. (1991):** Umweltpolitik mit Ökosteuern? Ökologisch und finanzpolitische Bedingungen für neue Umweltabgaben. Metropolis, Marburg.
- Berg, E.; Kuhlmann, F. (1992):** Systemanalyse und Simulation für Agrarwissenschaftler und Biologen. Methoden und PASCAL-Programme zur Modellierung dynamischer Systeme. Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart.
- BFE (2005):** Die Energieetikette. Maßnahmen zur Absenkung des Flottenverbrauchs: Abschätzung der Wirkung. Bundesamt für Energie (BFE). Bern. www.energieetikette.ch, abgerufen am 5.11.2005.
- BGW (2005):** Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft BGW e.V.: Zukunft gestalten. Berlin, Internet: <http://www.bundesverband-gas-und-wasser.de/bgw/indexflash.html>, abgerufen am 16.01.2006.
- Bierlaire, M. (1997):** Discrete Choice Models. Intelligent Transport Systems Program. Massachusetts Institute of Technology. Boston.

Bierlaire, M. (1998): Discrete Choice Models. In: Labbé, M., Laporte, G., Tanczos, K., Toint, P. (Hrsg.): Operations Research and Decision Aid Methodologies in Traffic and Transportation Management, S. 203-227. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

BMF (2004): Bundesministerium der Finanzen: Mineralölsteuergesetz, Stand 1. Januar 2004, Berlin. (Mineralölsteuergesetz.pdf)

BMF (2005): Bundesministerium für Finanzen (BMF): Kfz-Steuer und Verkehr. Bundesministerium für Finanzen, Referat für Bürgerangelegenheiten. Berlin.

BMF (2006a): Bundesministerium der Finanzen: Verbrauchssteuern, Berlin, Internet: http://www.zoll.de/b0_zoll_und_steuern/b0_verbrauchsteuern/index.html, abgerufen am 06.02.2006.

BMF (2006b): Bundesministerium der Finanzen: Die Höhe der Stromsteuer, Berlin: Internet: http://www.zoll.de/b0_zoll_und_steuern/b0_verbrauchsteuern/d0_strom/b0_hoehe_stromsteuer/index.html, abgerufen am 06.02.2006.

BMU (2004): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Umweltpolitik: Umweltbewußtsein in Deutschland 2004. Berlin. www.umweltstudie2004.de, abgerufen am 15.09.2005.

BMU (2005): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Pressedient Nr. 102/05: Trittin würdigt Japans Beitrag zum Inkrafttreten des Kyoto-Protokolls, 28.04.2005.

BMUJF (1998): Handbuch der Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs in Österreich - Grundlagenbericht zur Version 1.1A. Wien.

BMVBS (2005): Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Klimaschutzprogramm 2005 der Bundesregierung. Berlin, Internet: www.bmwbw.de/artikel,-1795/Klimaschutzprogramm-der-Bundes.htm, abgerufen am 9.10.2005.

BMVBS (2006a): Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Tiefensee stellt nationales Innovationsprogramm Wasserstoff und Brennstoffzelle vor. Berlin. 1.04.2006, Nr.: 105/ 2006.

BMVBS (2006b): Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Tiefensee und Perben wollen Wasserstoff für den Verkehr nutzbar machen. Berlin. 14.03.2006, Nr.: 081/ 2006.

Bogaschewsky, R. (1995): Natürliche Umwelt und Produktion – Interdependenzen und betriebliche Anpassungsstrategien, Neue Betriebswirtschaftliche Forschung (nbf), 157. Gabler, Wiesbaden.

Böhmer, W. (2004): Wasserstoff-Wirtschaft – Hin zu einer grüneren Welt, Energiewirtschaft (ew) Jg. 103, 2004, S. 20-25.

Borrmann, M.; Peistrup, M. (2004): City-Maut auf Basis von Grenzkostenpreisen. In: Internationales Verkehrswesen (56), 11/ 2004, S. 488-492.

Böhret, C., Konzendorf, G. (2001): Handbuch zur Gesetzesfolgenabschätzung. Nomos-Verlagsgesellschaft. Baden Baden.

Börsch-Supan, A. (1987): Econometric analysis of discrete choice – with applications on demand for housing in the U.S. and West Germany. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.

- Börse (2005):** Europas erstes Finanzportal www.boerse.de: Aktueller Kurs FOREX 03.01.2005, 16:46:33. Traunstein: Internet. <http://www.boerse.de>, abgerufen am 03.01.2005.
- Bosch (2002):** Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. 24. Auflage. Vieweg Verlag, Wiesbaden.
- Bosch (2003):** Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. 25. Auflage. Vieweg Verlag, Wiesbaden.
- Bosch (2004):** ‚Diesel Day in Japan‘ am 4.06.2004. Tokio, Japan
- Bosch (2006):** Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. Aktualisierte Abgasgesetzgebung. Vieweg Verlag, Wiesbaden.
- Bossel, H. (1992):** Simulation dynamischer Systeme: Grundwissen, Methoden, Programme. 2. Aufl.. Vieweg Verlag, Wiesbaden.
- Boudette, N. E. (2005):** Auto Giants Think Small. In: Wall Street Journal Europe, 4.03.2005.
- Braess, H; Seiffert, U. (2003):** Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 3. Auflage, Vieweg, Wiesbaden.
- Brauer, H. (1996):** Handbuch des Umweltschutzes und der Umweltschutztechnik. Band 1: Emissionen und ihre Wirkungen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Braunberger, G. (2004):** Frankreich bereitet Sonderabgabe für große Autos vor. In: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 22.06.2004.
- Brendel, M. (2005):** VW will Diesel in den USA aggressiv vermarkten. In Vereinigte Wirtschaftsdienste GmbH (VWD), 5.01.2005.
- Bretzke, W. F. (1975):** Das Prognoseproblem bei der Unternehmensbewertung. In: Sieben, G. (Hrsg.): Schriftenreihe des Seminars für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre und für Wirtschaftsprüfung der Universität zu Köln, Bd. IdW Verlag., Düsseldorf.
- Bringezu, S. (1997):** Umweltpolitik – Grundlagen, Strategien und Ansätze ökologisch zukunftsfähigen Wirtschaftens. Oldenbourg Verlag, München, Wien.
- Broadbent, J. (1998):** Environmental Politics in Japan. Networks of Power and Protest. Cambridge University Press, Cambridge (UK).
- Brockhoff, K. (1977):** Prognoseverfahren für die Unternehmensplanung. Gabler-Verlag, Wiesbaden.
- Brockhoff, K. (1992):** Forschung und Entwicklung: Planung und Kontrolle, 3. Aufl.. Verlag, München.
- Bruch, J. (2005):** Dieselpartikelemissionen, ihr Potential und die Bedeutung von Schwellenwerten für eine Risikoabschätzung. 26. Internationales Wiener Motorensymposium 2005.
- Bullinger (1991):** Strategieunterstützungssysteme. In: Milling, P. (Hrsg.): Systemmanagement und Managementsysteme [Festgabe für Gert v. Kortzfleisch zum 70. Geburtstag]. Verlag Duncker&Humblot. Berlin, S. 79-98.
- Bunch, D. S.; Bradley, M.; Golob, T. F.; Kitamura, R.; Ochiuzzo, G. P., (1992):** Demand for clean fuel personal vehicles in California – a discrete choice stated preference survey. University of California, Institute of Transportation Studies, Irvine.
- Bundesregierung (1972):** Umweltschutz: das Umweltprogramm der Bundesregierung. Kohlhammer, Stuttgart, Berlin, Köln.

- Bunting, A. (2004):** The realities of a hydrogen economy, in Automotive World (AW) Knowledge, 18.11.2004.
- Bunting, A. (2005):** California's Hydrogen optimists challenged. In Automotive World (AW) Knowledge, 17.01.2005.
- Bunz, A. (1988):** Strategieunterstützungsmodelle für Montageplanungen: System Dynamics-Modelle zur Analyse und Gestaltung der Flexibilität von Montagesystemen. Peter Lang Verlag, Frankfurt am Main.
- BMVBS et al. (2001):** Verkehrsprognose 2015 für die Bundesverkehrswegeplanung. Schlußbericht. Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (FE-Nr. 96.578/1999). München.
- Cansier, D. (1995):** Ökonomie der Luftreinhaltung. In: Junkernheinrich, M. u.a. (Hrsg.): Handbuch zur Umweltökonomie. Analytica-Verlagsgesellschaft, Berlin.
- Cansier, D. (1996):** Umweltökonomie. Lucius & Lucius, Stuttgart.
- Cansier, D. (1998):** Ausgestaltungsformen handelbarer Emissionsrechte und ihre politische Durchsetzbarkeit, in: Bonus, H. (Hrsg.): Zeitschrift für angewandte Umweltforschung (ZAU). Sonderheft 9. Umweltzertifikate – Der steinige Weg zur Marktwirtschaft. Analytica-Verlags. Berlin, S. 97-112.
- Car and Driver (2004)**
- Carle, Gian (2004):** Erdgasfahrzeuge im Wettbewerb, Arbeitsbericht Verkehrs- und Raumplanung 269, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), Zürich: ETH Hänggerberg (HIL), <http://www.ivt.ethz.ch/vpl/publications/reports/ab269.pdf>, abgerufen am 27.01.2005.
- Cavelty, U. P. (2004):** An der Schwelle zur Nachhaltigkeit. In: Neue Zürcher Zeitung, 29.04.2004.
- CEP (2006):** Clean Energy Partnership: Mobil mit Wasserstoff. In: <http://www.cep-berlin.de>, abgerufen am 16.02.2006.
- CFCP (2006):** California Fuel Cell Partnership Committee on Japan's Experience in the Battle against Air Pollution (1997) Japan's Experience in the Battle against Air Pollution, The Pollution-Related Health Damage Compensation and Prevention Association.
- Choren (2007):** Biomass to Energy. Freiberg, Internet. <http://www.choren.de>, abgerufen am 20.08.2007.
- Conant, R. C.; Ashby, W. R. (1970):** Every good Regulator of the System must be a model of that system. In: International Journal of System Dynamics, Vol. 1, No. 2, S. 89-97.
- Cookson, C. (2005):** Research into batteries has gone flat. In: Financial Times, 8.02.2005.
- Corstjens, M. L., Gautschi, D. A. (1983):** Formal Choice Models in Marketing. In: Marketing Science Bd. 2, Nr. 1, S. 19-56.
- Coyle, R. G. (1998):** The practice of system dynamics: milestones, lessons and ideas from 30 years experience. In: System dynamics review, Bd. 14, Nr. 4, S. 343-366.
- Cramer, J. S. (1991):** The Logit Model – An Introduction. Edward Arnold – A division of Hodder&Stoughton, London.

- Daisho, Y. (2003):** Recent Trends in the Development of Low-Emission and Fuel-Efficient Vehicles in Japan. In: Science and Technology in Japan 84, S. 9-14.
- DAT (2002):** Deutsche Automobil Treuhand GmbH (DAT): DAT-Veedol Report 2002. Höchberg.
- DAT (2004a):** Deutsche Automobil Treuhand GmbH (DAT): KFZ-Betrieb Dossier: DAT-Report 2004. Vogel Druck und Medienservice, Würzburg.
- DAT (2004b):** Deutsche Automobil Treuhand GmbH (DAT): DAT Report 2004 (Kfz-Betrieb Dossier). Vogel Druck und Medienservice, Würzburg.
- DAT (2004c):** Deutsche Automobil Treuhand GmbH (DAT): Leitfaden zu Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen. Ostfildern, Internet. <http://www.dat.de>, abgerufen am 13.01.2005.
- Dawson, C. (2005):** How Hybrid are going Mainstream. In Business Week, 22.10.2004.
- DC (2001):** Realization of a Clean Diesel Engine for less impact on the Environment. Diesel Seminar DaimlerChrysler AG (DC). Tokio, 12.11.2001.
- Deaton, M. L.; Winebrake, J. J. (1999):** Dynamic Modeling of Environmental Systems. Springer-Verlag, New York.
- Deckstein, D. (2005):** Eine Wasserstoff-Autobahn für Deutschland. In: Süddeutsche Zeitung vom 24.02.2005.
- Dekimpe, M. G.; Parker, P. M.; Sarvary, M. (2000):** Multimarket and global diffusion. In: Mahajan, V.; Muller, E.; Wind, Y. (Hrsg.): New Product Diffusion Models. International Series in Quantitative Marketing. Kluwer Academic Publishers Group, Boston (Mass.), S. 3-25.
- Dekra (2006):** Kfz Besitzer müssen die Emissionswerte bei einer Abgasuntersuchung regelmäßig untersuchen lassen. Internet: www.dekra.de/sachverstaendige/emissionswerte-abgasuntersuchung.htm
- Deutsche Energie Agentur (2006):** Pkw-Energieverbrauchskennzeichnung. Internet: <http://www.deutsche-energie-agentur.de/page/index.php?id=2341&type=5.com>
- Deym, A. v. (1992):** Organisationsplanung – Leitfaden für die innerbetriebliche Durchführung von Organisationsänderungen. Siemens AG. Berlin München.
- DIW (2002):** Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW): Fahrleistungen und Kraftstoffverbrauch im Straßenverkehr. In: DIW Berlin Wochenbericht Nr. 51-52/2002. Verlag Duncker&Humblot. Berlin, S. 881-889.
- DLR (2002):** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR): Flottenverbrauch 2010. Aktivierung des Reduktionspotentials und Beitrag zum Klimaschutz. Endbericht. Berlin: DLR, IFEU, IWW. <http://eprints.vf.ba.dlr.de/360/01/EndberichtFlotte.pdf>, abgerufen am 11.01.2005.
- Doemens, K. (2005):** Rot-Grün will saubere Diesel-Autos fördern. In: Handelsblatt, 02.02.2005. Springer-Verlag, Berlin.
- Dörner, D. (2001):** Die Logik des Mißlingens: Strategisches Denken in komplexen Situationen. Rowohlt-Verlag, Reinbek bei Hamburg.
- Downs, A. (1972):** Up and Down with Ecology – The Issue Attention Cycle. In: Public Interest 28, S. 38-50.

- Doyle, J. K., Ford, D. N. (1998):** Mental models concepts for system dynamics research. In: System dynamics review. Bd. 14, Nr. 1, S. 3-30.
- Dries, F. (2004):** Störfaktor Öl. In: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 6.08.2004.
- Drucker, P. F. (1996):** Umbruch im Management – Was kommt nach dem Reengineering? Econ-Verlag, Düsseldorf.
- Ducke, I. (2005):** Deutschland als Vorbild im japanischen Umweltdiskurs. In: Deutsches Institut für Japanstudien DIJ (Hrsg.): Japanstudien – Deutschland in Japan, Bd. 17. IUDICIUM-Verlag, München.
- Dudenhöffer, F. (2005a):** Die Marktentwicklung von Hybrid-Fahrzeug-Konzepten. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) 4/2005, Jg. 107, S. 330-335.
- Dudenhöffer, F. (2005b):** Ohne Steuerförderung kommt der Diesel-Partikelfilter nur langsam in Schwung. B&D-Forecast-Studie, Januar 2005. (Studie-Partikelfilter-neu-Jan. 2005.pdf).
- DUH (2005a):** Raubtierlobbyismus der Automobilindustrie beeinträchtigt die Umwelt und die Chancen deutscher PKW auf dem Weltmarkt. Pressemitteilung 11.01.2005. Pressekonferenz der Deutschen Umwelthilfe.
- DUH (2005b):** Entwurf - Verordnung zur Kennzeichnung emissionsarmer Kraftfahrzeuge. Pressekonferenz der Deutschen Umwelthilfe, 28.4.2005.
- Duncan, G. T.; Gorr, W. L.; Szczypula, J. (2001):** Forecasting analogous time series. In: Armstrong, S. (Hrsg.): Principles of Forecasting. A Handbook for Researchers and Practitioners. Kluwer Academic Publishers (KAP), S. 195-213.
- Dutta, A.; Roy, R. (2004):** The Mechanics of Internet Growth. In: International Journal of Electronic Commerce, Ausgabe 5, Nr. 2pp.
- DY (2003a):** Biomass holds promise for clean energy. In: The Daily Yomiuri, 18.03.2003.
- DY (2003b):** Transport ministry ends exhaust filter subsidies. The Daily Yomiuri, 17.06.2003.
- DY (2003c):** Firms find it hard to keep on trucking – new rule on diesel vehicles overwhelms municipalities trucking businesses. The Daily Yomiuri. 29.09.2003.
- Dyllick, Th (1989):** Management der Umweltbeziehungen. Verlag Gabler. Wiesbaden.
- E4Tech (2004):** Treibende Faktoren für alternative Fahrzeuge, Volkswagen Entwicklung Elektrofahrzeuge, 25.06.2004.
- ECCJ (2005):** Specific Details of the Top Runner Target Production Standards. The Energy Conservation Center, Japan (ECCJ). http://www.eccj.or.jp/index_e.html, abgerufen am 30.09.2004.
- Eckey, H. F., Kosfeld, R.; Dreger, C. (2001):** Ökonometrie. Verlag Gabler. Wiesbaden.
- Eckhardt, Jens (2004):** Kaliforniens Umweltpolitik alarmiert die US-Autobranchen. In: Handelsblatt, 14.06.2004.
- Eggert, W. (2003):** Nachfragemodellierung und –prognose zur Unterstützung der langfristigen Absatzplanung am Beispiel der deutschen Automobilindustrie. Karlsruhe. Internet, abgerufen am 16.09.2004.
- EGT (2004):** Gesamtfahrzeugentwicklung Volkswagen: Länderspezifikationen, 1.11.2004.

Environmental Health Department (1997): Japan's Experience in the Battle against Air Pollution. The Pollution-Related Health Damage Compensation and Prevention Association.

Elseworth, C. (2004): California tells car giants to come clean. In: Daily Telegraph, 15.06.2004.

Endres, A. (1994): Umweltökonomie – Eine Einführung. Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Darmstadt.

Endres, A. (1988): Der Stand der Technik in der Umweltpolitik. Das Wirtschaftswissenschaftliche Studium. Vol. 17, S. 83-84.

Endres, A. (2000): Umweltökonomie. 2. Auflage. Kohlhammer, Stuttgart, Berlin, Köln..

Endres, A; Holm-Müller, K. (1998): Die Bewertung von Umweltschäden – Theorie und Praxis sozioökonomischer Verfahren. Kohlhammer, Stuttgart.

Enke, H.; Gschwendtner, H.; Körber-Weik, M.; Lindner, H. (1984): Struktur, Konjunktur und Wirtschaftswachstum. Mohr. Tübingen.

EST (2003): International Conference on environmentally sustainable transport in the Asian Region, Nagoya 23.-25. März 2003, OECD, MOE, MLIT.

EU (2004): Konferenz "Energy in motion" der niederländischen Ratspräsidentschaft, 19./20.10.2004, Amsterdam, Niederlande.

EU-Kommission (2002): Mitteilung der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament. Besteuerung von Personenkraftwagen in der Europäischen Union. Handlungsmöglichkeiten auf nationaler und gemeinschaftlicher Ebene. KOM (2002) 431. EU-Kommission, Brüssel, 6.09.2002.

EU-Kommission (2005): Commission of the European Communities: Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on type approval of motor vehicles with respect to emissions and on access to vehicle repair information, amending Directive 72/306/EEC and Directive/EC. COM (2005) 683. EU-Kommission, Brüssel, 21.12.2005

EU-Kommission (2006): Information über den Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen der Personenkraftfahrzeuge. Internet: <http://europa.eu/scadplus/leg/de/lvb/l32034.htm>

Feichtinger, G.; Hartl, R. F. (1986): Optimale Kontrolle ökonomischer Prozesse: Anwendungen des Maximumprinzips in den Wirtschaftswissenschaften. De Gruyter, Berlin.

Felten, C. (2001): Adoption und Diffusion von Innovationen: Ein mikroökonomisches Modell. Gabler-Verlag, Wiesbaden.

Fickinger, N. (2005): Bunte Plaketten für saubere Autos. In Frankfurter Allgemeine Zeitung, 23.04.2005, S. 15.

Flehtner, H. (1969): Grundbegriffe der Kybernetik: Eine Einführung, 4. Aufl., Wiss. Verl.-Ges.. Stuttgart.

Flüchter, W. (1998): Geographische Fragestellungen, Strukturen, Probleme. In: Pohl, M., Mayer, H. J. (Hrsg.), Länderbericht Japan, Bundeszentrale für politische Bildung Band 355, S. 14 – 49.

FNR (2007): Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Internet. <http://www.fnr.de>, abgerufen am 24.08.2007.

- Foljanty-Jost, G. (1996):** Überlegungen zum deutsch-japanischen ökologischen Dialog. In: Foljanty-Jost (Hrsg.): Ökologische Strategien Deutschland/ Japan – Umweltverträgliches Wirtschaften im Vergleich. Leske & Budrich, Opladen.
- Ford, A. (1999):** Modeling the environment: An introduction to system dynamics. Island Press, Washington D.C [u.a.].
- Forrester, J. W. (1958):** Industrial Dynamics: A major breakthrough for decision makers, Harvard Business Review, Bd. 4, S. 37-66.
- Forrester, J. W. (1961):** Industrial Dynamics, Productivity Press, Cambridge (Mass.).
- Forrester, J. W. (1971a):** World Dynamics. Wright Allen Press, Inc., Cambridge (Mass.).
- Forrester, J. W. (1971b):** Counterintuitive Behaviour of Social Systems, Technology Review, Bd. 73, Nr. 3, S. 52-68.
- Forrester, J. W. (1972b):** Der teuflische Regelkreis: Das Globalmodell der Menschheitskrise (World Dynamics). Deutsche Verlags Anstalt, Stuttgart.
- Forrester, J. W. (1972a):** Grundzüge einer Systemtheorie (Principles of Systems). Verlag Dr. Th. Gabler, Wiesbaden.
- Forrester, J. W. (1994):** System Dynamics, System Thinking and soft OR, System Dynamics Review 10, S. 245-256.
- Fourin (2001):** Fourin's Monthly Report on the Domestic Automobile Industry. November 2001, No. 32.
- Fourin (2002):** Fourin's Monthly Report on the Domestic Automobile Industry. November 2002, No. 44.
- Frerichs, W.; Kübler, K. (1980):** Gesamtwirtschaftliche Prognoseverfahren. Verlag Franz Vahlen, München.
- Fritsch, M.; Wein, Th.; Ewers, H. J. (1996):** Marktversagen und Wirtschaftspolitik – mikroökonomische Grundlagen staatlichen Handelns. Verlag Franz Vahlen, München.
- Fritz, W. (1998):** Marketing. Elemente marktorientierter Unternehmensführung, 2. Aufl. Kohlhammer-Verlag, Stuttgart.
- Fujiwara, A.; Zhang, J.; Kuwano, M. (o.J.):** Analysis of ownership behaviour of low-emission passenger cars in local Japanese cities, Transportation Engineering Laboratory. Hiroshima University, Higashi-Hiroshima (Japan)
- Fukui, T. (2003):** (Honda) Anreize für Hybrid. In: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 11.09.2003.
- GAIM (2003):** Global Automotive Industry Meeting (GAIM): Diesel Acceptance, Tokio, 22.10.2003.
- Gardiner, P. C.; Ford, A. (1980):** Which policy run is the best, and who says so? In: Legasto, A. et al. (Hrsg.): System dynamics. North-Holland Publ. Co., Amsterdam [u.a.], S. 241-257.
- Gassmann, M. (2005):** BP wirft Autoindustrie mangelnden Ehrgeiz bei Erdgasmotoren vor. In Financial Times Deutschland, 3.03.2005. Düsseldorf.
- Gäthke, S. (2004):** Schwer vermittelbar. In Financial Times Deutschland, 29.11.2004.

- Gaus, H. (2000):** Wertesystem-Segmentierung im Automobilmarketing. Verlag Dr. Th Gabler, Wiesbaden.
- Gauß, C. (2001):** Testbericht. Untersuchung: Motoren mit Diesel-Direkteinspritzung und neuer Partikelfiltertechnik. ADAC Technik Zentrum. Landsberg.
- Gawel, E. (1991):** Umweltpolitik durch gemischten Instrumenteneinsatz – allokativer Effekt instrumenteller diversifizierter Lenkungsstrategien für Umweltgüter. Verlag Duncker&Humboldt. Berlin.
- Gawel, E. (1998):** Akzeptanzprobleme von Zertifikaten. In: Bonus, H. (Hrsg.): Zeitschrift für angewandte Umweltforschung (ZAU). Sonderheft 9. Umweltzertifikate – Der steinige Weg zur Marktwirtschaft. Analytica-Verlag, Berlin, S. 113-134.
- Geanacopoulos, D. (2005):** Report on US CO2 Regulations and other emission regulations, VWoA Industry-Government Relations Department, Washington D.C., Corporate Government Relations Steering Committee Meeting, Wolfsburg, Germany, 3.06.2005.
- Gibgas (2006):** Gibgas Consulting und Medien (Gibgas): Fahren mit Erdgas. www.gibgas.de, München.
- Global Insight (2007):** European Light Vehicle Industry Forecast Report. Global Insight. Automotive Markets Division. März 2007.
- Gluchowski, P.; Gabriel, R.; Chamoni, P. (1997):** Management-Support-Systeme: Computergestützte Informationssysteme für Führungskräfte und Entscheidungsträger. Springer-Verlag, Berlin [u.a.].
- Göres, M. (2006):** Wer Gas tankt, spart beim Gasgeben. In: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 22.04.2006.
- Götze, U. (1993):** Szenario-Technik in der strategischen Unternehmensplanung. Deutscher-Universitäts-Verlag (DUV), 2. Aufl., Wiesbaden.
- Goldmann, D. (2005):** Produktbezogener Umweltschutz – Rohstoffeffiziente Verwertung langlebiger Produkte am Beispiel der Altkarosserieverwertung. Vortrag am 28.10.2005. Volkswagen AG. Wolfsburg.
- Grunwald, A. (2002):** Technikfolgenabschätzung – eine Einführung. Edition Sigma, Berlin.
- Greene, W. H. (2000):** Econometric Analysis, 4. Aufl.. Prentice Hall, Inc., New Jersey.
- Griffiths, J. (2005):** It's a long and winding road for the car that runs on hydrogen alone, Financial Times, 8.02.2005.
- Grochla, E. (1964):** Betriebliche Planung. In: Handwörterbuch der Sozialwissenschaften, Bd. 8. O.V., Stuttgart, S.119-134.
- Gutenberg, E. (1961):** Die Produktion. Springer-Verlag. Berlin.
- Hack, G. (2004a):** Ein hoher Preis für die Autos mit dem Doppelherzen. In: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 30.03.2004.
- Hack, G. (2004b):** Der große Bluff. In: Auto, Motor und Sport, 9.11.2004.
- Hack, G. (2004c):** Die Liter-Leistung. In: Auto, Motor und Sport, 3.03.2004.
- Hack, G. (2005):** Alles Bio oder was?, In: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 24.07.2005.

- Hadler, J. (2005):** Der Dieselmotor im Spannungsfeld zwischen Fahrspaß, Verbrauch, Emissionen und Kosten, Motortechnische Konferenz „Der Antrieb von morgen“, 17.-18..02.2005.
- Hagenbüchle, W. (2005):** Weitere Hybrid-Speerspitze aus Japan. In: Neue Zürcher Zeitung, 2.06.2005.
- Hahn, D. (1974):** Prognose und Unternehmensplanung. In: Hammann, P. u.a. (Hrsg.): Neuere Ansätze zur Marketingtheorie. Verlag Duncker&Humblot. Berlin.
- Hakim, D. (2004a):** Several states likely to follow California on car emissions. In: New York Times, 11.06.2004.
- Hakim, D.: (2004b):** An auto industry ad leaves critics choking, International Herald Tribune, 22.03.2005.
- Hampicke, U. (1992):** Ökologische Ökonomie – Individuum und Natur in der Neoklassik. Westdeutscher Verlag. Opladen.
- Hansmann, K. W. (1983):** Kurzlehrbuch Prognoseverfahren – Mit Aufgaben und Lösungen. Verlag Dr. Th Gabler, Wiesbaden.
- Hassenpflug, W. (1998):** Luv und Lee – Sonne und Schnee – Monsun in Japan. In: Geographie heute 158, S. 8-13.
- Hautzinger, H., Haag, G., Helms, M., Hugo, J. (2005):** Autofahren um jeden Preis? In: Internationales Verkehrswesen (57) 3. Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg.
- Hayashi, Y., Kato, H., Teodoro, R. (2000):** A model system for the assessment of the effects of car and fuel green taxes on CO₂-emissions. In: Transportation Research. Elsevier Science Ltd., Article No. 140.
- Hayata, K. (o. J.):** The State of NGVs in Japan. Japan Gas Association. Datei: The State of NGVs in Japan.
- HEI (1999):** Health Effects Institute (HEI): Diesel Emissions and Lung Cancer: Epidemiology and Quantitative Risk Assessment.
- Heitmann, J (2005):** Immer mehr Deutsche tanken Biodiesel. In: Hannoversche Allgemeine Zeitung, 23.06.2005.
- Hemmelskamp, J. (1999):** Umweltpolitik und technischer Fortschritt – eine theoretische und empirische Untersuchung der Determinanten von Umweltinnovationen. Physica-Verlag, Heidelberg.
- Herberg, H. (1989):** Preistheorie, 2. Aufl. Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart.
- Herbruggen, B. van (2002):** In depth description of the TREMOVE Model. Transport & Mobility Leuven, www.tmleuven.be, abgerufen am 18.01.2004.
- Herbst, D. (2005):** Megatrend: Visuelle PR Corporate Imagery, http://www.source1.de/resource/DieterHerbst/th_bilderwelten/visuellepr.php, abgerufen am 1.03.2006.
- Hering, E.; Hermann, A.; Kronmüller, E. (1989):** Unternehmenssimulation mit dem PC. Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig.
- Hermann, R. (2006):** Kleinstaat mit großem Ziel. In: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 20.03.2006.

Herrmann, A. (1992): Produktwahlverhalten – Erläuterung und Weiterentwicklung von Modellen zur Analyse des Produktwahlverhaltens aus marketingtheoretischer Sicht. In: Schriftenreihe der Wissenschaftlichen Hochschule für Unternehmensführung Koblenz. Forschung/ 8. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart.

Hock, S. (2003): Renewable Hydrogen Production, National Renewable Energy Laboratory, Midwest Research Institute, Battelle, USA, at Renewable Hydrogen Forum, Washington, DC, USA, 10.-11.04.2003. Internet: http://www.ases.org/hydrogen_forum03/Hock.pdf, abgerufen am 04.02.2006.

Hoffmann-Riem, W.; Eifert, M. (1995): Umweltpolitische Kooperation. In: Junkernheinrich, M.u.a. (Hrsg.): Handbuch zur Umweltökonomie. Analytica-Verlagsgesellschaft, Berlin.

Hofmann, J.; Herz, C. (2005): Toyota bietet GM Hybridtechnik an. In Handelsblatt, 10.05.2005.

Hofmann, L; Steiger, W.; Adamis, P.; Petersen, J. (2003): Möglichkeiten und Grenzen von Elektromaschinen im Antriebsstrang; Volkswagen AG, Forschung, Umwelt und Verkehr.

Hohenstein, C., Pelchen, A, Wieler, B. (2002): Zertifikatehandel im Verkehrsbereich als Instrument zur CO₂-Reduzierung unter Berücksichtigung von Interdependenzen mit anderen Lenkungsinstrumenten und unter Gewährleistung der Kompatibilität zur EU-Gesetzgebung, Price Waterhouse Coopers (PWC), Kurzstudie im Auftrag des Rates für Nachhaltige Entwicklung. November 2002.

Honda (2005): Honda Motor Europe (North) GmbH: Automobile Honda – Immer in Bewegung. Offenbach, Internet: <http://www.honda.de/content/car/index.html>, abgerufen am 11.01.2005.

Hopf, R.; Vogt, U. (2002): Nachhaltige Verkehrsentwicklung erfordert verstärktes Handeln, in: Wochenbericht des Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Nr. 47/02.

Hüttner, M. (1982): Markt- und Absatzprognosen. Verlag Kohlhammer Stuttgart. Stuttgart.

Hüttner, M. (1986): Prognoseverfahren und ihre Anwendung. Walter de Gruyter Verlagsgesellschaft, Berlin.

Hüttner, M. (1997): Grundzüge der Marktforschung. Oldenbourg-Verlag. München.

IEA (2006): World Energy Outlook 2006. International Energy Agency, Paris (Frankreich), <http://www.iea.org>, abgerufen am 11.11.2006

IFEU (2002): Aktualisierung des „Daten- und Rechenmodell“: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen aus dem motorisierten Verkehr. Programmbeschreibung TREMOD, Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU) im Auftrag des Umweltbundesamtes. Heidelberg.

IFEU (2003): Erweiterung der Ökobilanz für RME. Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU). Heidelberg.

IFEU (2004): Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH (IFEU): Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. Version 2.1. Basisdaten Deutschland. Heidelberg, Internet: <http://www.hbefa.net>, abgerufen am 01.02.2005.

IFMO (2005): Institut für Mobilitätsforschung (ifmo): Zukunft der Mobilität – Szenarien für das Jahr 2025, 1. Auflage 2005. BMW AG, Berlin .

IFQC (2002): Japan's New Longterm Regulations for Future Vehicle Emissions and Fuels. Flash Report, International Fuel Quality Center (IFQC).

IMUG (2005): Medienpräsenzanalyse und quantitative Auswertung. In: Jahrbuch Umwelt und Verkehr 2004 – Diskussionen und Ereignisse des Jahres 2004 im Themenfeld Umwelt und Verkehr, Volkswagen AG, Konzernforschung, Abteilung Umweltstrategien/ Geschäftsprozesse

IPCC (2001a): Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): The Third Assessment Report – Climate Change 2001. Working Group I: The Scientific Basis. Geneva 2 (Schweiz): Internet: www.ipcc.ch, abgerufen am 13.02.2005.

IPCC (2001b): Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): The Third Assessment Report – Climate Change 2001. Working Group II: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Geneva 2 (Schweiz): Internet: www.ipcc.ch, abgerufen am 13.02.2005.

IWW (1996): Institut für Wirtschaftspolitik und Wirtschaftsforschung: Wissenschaftliche Begleituntersuchung zum Verkehrswegeplan Baden-Württemberg, Teil 3. Methoden und Datenmaterial. Karlsruhe.

J.D. Power (2006): Global Demand for Diesel-Fueled Vehicles to Nearly Double During the next 10 years. Press Release. J.D. Power and Associates Reports 13.04.2006. Westlake Village (Calif.).

JAIA (2004): Japan Automobile Importers Association (JAIA): Requests on “How the Future Energy-Saving Policy should be”, Interim Report of the Energy-Saving Committee of the METI’s Council for Overall Policy for Energy and Natural Resources, 10.06.2004.

JAIA (2006): Environmental Incentives for Passenger Cars. Japan Automobile Importers Association (JAIA), Tokio. Japan.

JAMA (2002): 2002 The Motor Industry of Japan, Japan Automobile Manufacturers Association (JAMA), Inc.. Tokio. Japan.

JAMA (2003a): 2003 The Motor Industry of Japan. Japan Automobile Manufacturers Association (JAMA), Inc., Tokio Japan.

JAMA (2003b): A better environment for future generations, Japan Automobile Manufacturers Association (JAMA), Inc., Tokio. Japan.

JAMA (2004a): 2004 The Motor Industry of Japan, Japan Automobile Manufacturers Association, Inc. (JAMA), Tokio Japan.

JAMA (2004b): Fiscal Year 2003 Passenger Car Market Trend Survey, Japan Automobile Manufacturers Association, Inc. (JAMA), Tokio (Japan); Datei: [JAMA \(2004c\)](#)

JAMA (2004c): Fiscal 2003 Low Emission Vehicle Shipments, Japan Automobile Manufacturers Organization, Inc., Tokyo (Japan), <http://www.jama-english.jp/release/release/2004/041013.html>, abgerufen am 10.05.2005.

JAMA (2005a): 2005 The Motor Industry of Japan. Japan Automobile Manufacturers Association, Inc. (JAMA), Tokio. Japan.

JAMA (2005b): Motor Vehicle Statistics of Japan. Japan Automobile Manufacturers Association, Inc. (JAMA), Tokio (Japan).

JAMA (o. J.): Motor Vehicle Statistics in use by year. Japan Automobile Manufacturers Association, Inc. (JAMA), Tokio (Japan).

Jänicke, M. (1995): Akteure der Umweltpolitik. In: Junkernheinrich, M. u.a. (Hrsg.): Handbuch zur Umweltökonomie. Analytica-Verlagsgesellschaft. Berlin.

JMA (2005): Japan Meteorological Agency, Internet: <http://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>, abgerufen am 21.12.2005.

Johnson-Laird, P. N. (1983): Mental models: towards a cognitive science of language, inference and consciousness. Cambridge University Press, Cambridge.

JT (1999): "I will oust diesel cars from Tokyo", In: Japan Times (JT), 10.08.1999.

JT (2000): Diesel exhaust carcinogenic – more research urged, In: Japan Times (JT), 12.08.2000.

JT (2002): Astmathics win state air-pollution suit, In: The Japan Times (JT), 30.10.2002.

Junkernheinrich, M. (1998): Handelbare Emissionsrechte im verkehrspolitischen Instrumentenmix. In: Bonus, H. (Hrsg.): Zeitschrift für angewandte Umweltforschung (ZAU). Sonderheft 9. Umweltzertifikate – Der steinige Weg zur Marktwirtschaft. Analytica-Verlag, Berlin, S. 209-221.

Kaas, K. P. (1980): Thurstone's Law of Comparative Judgement, in: WiSt Heft 5 (Mai), S. 233-235.

Kalt, G. (2003): Gewappnet sein ist möglich: Issues Management in der Medienarbeit – Zur Identifizierung und Steuerung von Krisen und Chancenthemen durch praxisnahe Begleitforschung. In: Kuhn, M.; Kalt, G.; Kinter, A. (Hrsg.): Chefsache Issues Management. F.A.Z.-Institut für Management-, Markt- und Medieninformation. Frankfurt am Main, S. 97-112.

Kamenz, U. (2001): Marktforschung – Einführung mit Fallbeispielen, Aufgaben und Lösungen, 2. Aufl.. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart.

KBA (2003): Kraftfahrtbundesamt (KBA): Statistische Mitteilungen. Reihe 3: Kraftfahrzeuge. Neuzulassungen - Besitzumschreibungen - Löschungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern im Jahr 2003. Jahresband. Flensburg: Internet: www.kba.de/Reihe3_2003.pdf, abgerufen 25.01.2006.

KBA (2004a): Statistische Mitteilungen. Reihe 1: Fahrzeugzulassungen. Neuzulassungen - Besitzumschreibungen - Löschungen - Bestand. Oktober 2004. Flensburg: Internet: www.kba.de/Reihe1_2004_10.pdf, abgerufen 25.12.2005.

KBA (2004b): Kraftfahrtbundesamt (KBA): Statistische Mitteilungen. Reihe 2: Fahrzeugbestand. Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern am 1. Januar 2004. Jahresband. Flensburg: Internet: http://www.kba.de/Reihe2_2004.pdf, abgerufen am 25.12.2005.

Kemfert, C. (1998): Makroökonomische Wirkungen umweltökonomischer Instrumente: Eine Untersuchung der Substitutionseffekte anhand ausgewählter volkswirtschaftlicher Modelle für Deutschland. Peter Lang Verlag, Frankfurt am Main.

Kieckhäfer, K. (2008): Untersuchungen der Auswirkungen eines Energieeffizienzlabels für PKW auf das Kaufverhalten von Endkunden mittels formaler Modellierung (Diplomarbeit). Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik. Technische Universität Braunschweig, Braunschweig.

Kirchgässner, G. (1995): Umwelthaftung. In: Junkernheinrich, M. u.a. (Hrsg.): Handbuch zur Umweltökonomie. Analytica-Verlagsgesellschaft, Berlin.

Kirkwood, C. W. (1998): System Dynamics Methods – A Quick Introduction, Internet: <http://www.public.asu.edu/~kirkwood/sysdyn/SDRes.htm>, abgerufen am 15.08.2005.

Kitamura (2004): Interview von Herrn G. Meyer mit Prof. Kitamura zum Thema Kaufkriterien japanischer Kunden vom 15.10.2004, Universität Kyoto, Kyoto (Japan); Datei: Interview Kitamura 2004.

Klepper, G. (2001): Globalisierung der Weltwirtschaft und Stoffströme. In: Kieler Arbeitspapier, Nr. 1082, Institut für Weltwirtschaft an der Universität Kiel.

Knippert, U.; Wagner, S. (Hrsg.) (2003): Alexander. KombiAtlas. Erdkunde, Geschichte, Sozialkunde und Wirtschaft. Verlag Gotha. Gotha.

Köhn, J. (1996): Autos und Zertifikate – Neue Ansätze für die Automobilpolitik aus der ökologischen und ökonomischen Perspektive. In: Köhn, J.; Welfens, M. J. (Hrsg.): Neue Ansätze in der Umweltökonomie. Metropolis Verlag, Marburg, S. 449-478.

Köhn, R. (2004): Die Zukunft liegt im verflüssigten Erdgas. In: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 3.01.2006.

Koike, Y. (2005): Japan on the Move – Japan's innovative technologies for tackling climate change.

Kopfer, H.; Bierwirth, C. (2003): Grundlagen der Systemorientierung. In: Baumgarten, H. u.a. (Hrsg.): Logistik-Management: Strategien, Konzepte, Praxisbeispiele. Springer-Verlag, Berlin [u.a.].

Kösters, W. (1997): Umweltpolitik: Themen, Funktionen, Zuständigkeiten. Olzog Verlag, Landsberg am Lech.

Kuchenbecker, K. (1999): Strategische Prognose und Bewertung von Verkehrsentwicklungen mit System Dynamics. In: Rothengatter, W.; Kowalski, J. (Hrsg.): Karlsruher Beiträge zur wirtschaftspolitischen Forschung. Institut für Wirtschaftspolitik und Wirtschaftsforschung der Universität Karlsruhe. Band 8. Nomos Verlagsgesellschaft, Baden-Baden.

Küffner, G. (2004): Wasserstoff fällt nicht vom Himmel. In: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 10.08.2004.

Laforsch, M. (1999): Kosten der Luftreinhaltung – ein Ansatz zur Erstellung von Kostenfunktionen für die Emissionsminderung zur Unterstützung internationaler umweltpolitischer Verhandlungen. Lang Verlag, Frankfurt am Main.

Lahmann, E. (1996): Umweltmedium Luft. In: Brauer, H. (Hrsg.), Handbuch des Umweltschutzes und der Umweltschutztechnik. Band 1: Emissionen und ihre Wirkungen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

Larsen, E.; Bunn, D. (1999): Deregulation in electricity: Understanding strategic and regulatory risk. Journal of the Operational Research Society, Bd. 50, Nr. 4, S. 337-344.

Laux, H. (1998): Entscheidungstheorie, 4. Aufl.. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

Law, A. M.; Kelton, W. D. (2000): Simulation Modeling and Analysis. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

Lee, J. L.; Wonacott, P. (2004): Cars in China face fuel-efficiency rules, Wall Street Journal Europe, 11.10.2004.

Lenz, H. P.; Cozzarini, C. (1998): Emissionen und Luftqualität, In: VDI Reihe 12; Nr. 365: Verkehrstechnik/ Fahrzeugtechnik, VDI-Verlag, Düsseldorf

Lexus 2005: http://www.lexus.de/lexus_cars/rx/rx400h/index.asp

- Liebert, M. (2001):** Methodische Entscheidungsunterstützung in der strategischen Marketingplanung – Ein systemdynamischer Ansatz am Beispiel der Automobilindustrie. Josef Eul Verlag, Köln.
- Liebl, F. (1995):** Simulation, 2. Aufl.. Oldenbourg-Verlag, München.
- Liedke, H.; Marcinek, J. (1994):** Physische Geographie Deutschlands. J. Perthes Verlag, Gotha.
- Lilien, G. L., Kotler, P. (1983):** Marketing Decision Making – A Model-Building Approach, Harper&Row, Publishers, Inc., New York.
- Linde (2004):** Linde-Technik in Japan zertifiziert – Erste Flüssiggastankstelle, Internet: www.linde.de, abgerufen am 18.02.2006.
- Linde (2006):** H2-Tankstellen von München bis Tokio, Internet: www.linde-gas.de, abgerufen am 16.02.2006.
- Lohmann, D. (1999):** Umweltpolitische Kooperationen zwischen Staat und Unternehmen aus Sicht der Neuen Institutionenökonomik. Metropolis-Verlag, Marburg.
- LPG-V-Guide (2006):** Liquefied Petroleum Gas Vehicle Guide, <http://www.j-lpgas.gr.jp/lgv/index.html>, abgerufen am 10.03.2006.
- Luce, R. D. (1959):** Individual Choice Behaviour: A theoretical Analysis, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Lucius, R. v. (2006):** Mehr Steuern einfahren. In: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 3.01.2006, S. 8.
- Luhmann, N. (1979):** Öffentliche Meinung. In: Politik und Kommunikation. Verlag Piper, München, S. 29-61.
- Lutz, T. (2004):** Alternativantrieb, auto&technik 10/ 2004, S. 38-41.
- Mahajan, V.; Muller, E.; Wind, Y. (2000):** New Product Diffusion Models. From Theory to Practice. In: Mahajan, V. Muller, E., Wind, Y. (Hrsg.): New Product Diffusion Models. International Series in Quantitative Marketing. Kluwer Academic Publishers Group, Boston (Mass.), S. 3-25.
- Maier, G., Weiss, P. (1990):** Modelle diskreter Entscheidungen: Theorie und Anwendung in den Sozial- und Wirtschaftswissenschaften, Springer-Verlag, New York, Wien.
- Mainichi Shinbun (2002):** Plaintiffs win exhaust pollution suit but carmakers not responsible. 29.10.2002.
- Makridakis, S. (1980):** Prognosetechniken für Manager. Gabler, Wiesbaden.
- Makridakis, S.; Wheelwright, S. C. (1989):** Forecasting Methods for Management. John Wiley&Sons, Inc. New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore Toronto.
- Makridakis, S.; Wheelwright, S. C. Hyndman, R. C. (1998):** Forecasting – Methods and Applications. John Wiley and Sons, Inc.. New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore Toronto.
- Manski, C. (1977):** The structure of random utility models. In: Theory and Decision 8, 229-254.
- March, J. G.; Simon, H. A. (1994):** Organizations, 2. Aufl., Blackwell, Cambridge (Mass.) [u.a.].

- Margaria, G. (2000):** Outcome of the JC meeting on “Anti-Diesel Campaign in Japan”, E-mail vom 25.11.2000. (ACEA)
- Marklines (2005a):** Automotive Information Platform – Auto Industry Analysis Report. 7. November 2005, No. 362.
- Marklines (2005b):** Automotive Information Platform – Auto Industry Analysis Report. 7. November 2005, No. 424.
- Markus, F. (2004):** Diesel now offer superior performance, fuel economy and longevity, but have CARB and the EPA made outlaws of them. In Car and Driver, 1.03.2004.
- Marutschke, H.-P. (1999):** Einführung in das japanische Recht. Beck, München.
- Maurer, G. (2004):** Diesel-Angriff mit ungewissem Ausgang. In: Automobilwoche, 19.01.2004.
- Meadows (1972):** Die Grenzen des Wachstums – Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart.
- Meadows, D. (1980):** The unavoidable a priori. In: Randers, J. (Hrsg.): Elements of the System Dynamics Method. Pegasus Communications, Waltham (Mass.), S. 23-57.
- Meffert, H., Steffenhagen, H. (1977):** Marketing-Prognose-Modelle – Quantitative Grundlagen des Marketing. C.E. Poeschel Verlag. Stuttgart.
- Meffert, H.; Kirchgeorg, M. (1998):** Marktorientiertes Umweltmanagement: Konzeption, Strategie, Implementierung mit Praxisfällen, 3. Aufl. Schäffer-Poeschel, Stuttgart.
- Merker, G. P.; Stiesch, G. (1999):** Technische Verbrennung. Motorische Verbrennung. Teubner. Stuttgart.
- METI (o. J.):** What is the top runner program – Japan’s approach to Energy Efficiency and Conservation Measures. Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), The Energy Conservation Center, Japan (ECCJ).
- METI (2004):** Ministry of Economy, Trade and Industry (METI): METI’s Energy Saving Policy toward 2010.
- METI (2005):** Ministry of Economy, Trade and Industry (METI): Summary of METI’s fifth meeting of ,Study group of Clean Diesel car popularization and future prospects’.
- Metz, N. (2004):** Wie umweltfreundlich ist der Dieselmotor wirklich? Internationales Verkehrswesen (56) 7+8/ 2004.
- Meyer, H. (2005):** Erläuterungen zu Folien „CO2-basierte Besteuerung“, Presentation on CO₂, ACEA. (ACEA__Presentation_on_CO2__draft__14[1].1.2005.doc)
- Mez, L.; Jänicke, M; Binder, M. (1997):** Einleitung – Umweltpolitik als sektorale Politik. In: Mez, L. u.a. (Hrsg.): Sektorale Umweltpolitik: Analysen im Industrieländervergleich. Ed. Sigma Verlag, Berlin, S. 9-15.
- Michaelis, P. (1996):** Ökonomische Instrumente in der Umweltpolitik – eine anwendungsorientierte Einführung. Physica-Verlag, Heidelberg.
- Michaelis, P. (2004):** Handelbare Emissionsrechte im motorisierten Individualverkehr. In: Döring, R., Rühs, M. (Hrsg.): Ökonomische Rationalität und praktische Vernunft. Königshausen & Neumann, Würzburg.

- Milling, P. (2002):** Kybernetische Überlegungen beim Entscheiden in komplexen Systemen. In: Milling, P. (Hrsg.): Entscheiden in komplexen Systemen. Verlag Duncker&Humblot. Berlin, S. 11-26.
- Milling, P. (1974):** Der technische Fortschritt beim Produktionsprozeß. Ein dynamisches Modell für innovative Industrieunternehmen. Verlag Gabler. Wiesbaden.
- Milling, P., Maier, F. (1996):** Invention, Innovation und Diffusion – Eine Simulationsanalyse des Management neuer Produkte. Verlag Duncker&Humblot. Berlin.
- Millington, A. (2000):** ACEA JC discussion on the “Anti-Diesel Campaign in Japan”, E-mail vom 25.11.2000. (ACEA)
- Miyazaki, Y. (1996):** Neuere Tendenzen in der japanischen Umweltpolitik unter besonderer Berücksichtigung des Umweltrahmengesetzes, in: Foljanty-Jost (Hrsg.): Ökologische Strategien Deutschland/ Japan – Umweltverträgliches Wirtschaften im Vergleich. Leske & Budrich, Opladen.
- MLIT (2003):** International Workshop on CDM/JI in the Transport Sector, Tokio 27-28. März 2003. Japan.
- MOE (2000):** Statistics ‘Air and Transportation’. Ministry of Environment (MOE) <http://www.env.go.jp/en/statistics>. Tokio, Japan.
- MOE (2003):** Jidousha NO_x PM Hou no Shashukisei ni tsuite. (Automotive NO_x and PM Law). Ministry of Environment (MOE). Tokio, Japan.
- Mollet, A. (2005):** Japan and the US: a trade war waiting to happen? AW Knowledge, 18.07.2005.
- Morecroft, J. D. (1984):** Strategy Support Models, Strategic Management Journal, Nr. 5, S. 215-229.
- Morecroft, J. D. (1999):** Visualising and Rehearsing Strategy, Business strategy review, Bd. 10, Nr. 3, S. 17-32.
- Morecroft, J. D.; Sterman, J. D. (1994):** Modeling for learning organizations. Waltham (Mass.). Pegasus Communications.
- Morisaki, K. (2002):** Fuel Cell Vehicles – Strategy of Japanese Government and Private Companies, in: Science and Technology in Japan, No. 82. 20-38.
- Mot (2004):** Kaufberatung Erdgas-Autos – Mit neuer Energie. Mot-Verlag, Ausgabe 16/2004.
- Müller, E. (1985):** Innenwelt der Umweltpolitik: sozialliberale Umweltpolitik – (Ohn)macht durch Organisation? Westdeutscher Verlag, Opladen.
- Müller-Wondorf, R. (2005):** Hybrid hat kleinen Markt in Europa, VDI-Nachrichten, 28.10.2005.
- Münch, R. (1995):** Verkehr und Umwelt – Handlungsbedarf und Handlungsoptionen. In: Benkert, W. u.a. (Hrsg.): Wo bleiben die Umweltabgaben? Erfahrungen, Hindernisse, neue Ansätze. Ökologie und Wirtschaftsforschung Bd. 17. Metropolis Verlag, Marburg., S. 213-240.
- Münchener Rück (2006):** Topics 1/2006 – Klimawandel, Solvency II, Berufsunfähigkeit. Internet: <http://www.munichre.com>, abgerufen am 20.05.2006.

- Murata, S. (1986):** Marketing, Wettbewerb und Markteintritt in Japan. In: Simon, H. (1986): Markterfolg in Japan – Strategien zur Überwindung von Eintrittsbarrieren. Verlag Gabler. Wiesbaden, S. 37-51.
- N.N. (2002):** Holy Wrath Descends on Gas Guzzlers, In: Financial Times, 21.11.2002.
- Naert, P. A., Bultez, A. V. (1972):** Logically consistent market share models. In: Working Paper Alfred P. Sloan School of Management 607-72.
- Naert, P. A., Gijsbrecht, E. (1985a):** A Diffusion model for new product introduction in existing markets, in: Europäisches Institut für Unternehmensführung – Working Research Papers, No. 2. Fontainebleau.
- Naert, P. A.; Gijsbrecht, E. (1985b):** Towards a Decision Support System for hierarchically allocating marketing resources across and within product groups, in: Europäisches Institut für Unternehmensführung – Working Research Papers, No. 3.
- Naunin, u.a. (2004):** Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge – Technik, Strukturen und Entwicklungen, 3.Auflage, Kontakt & Studium Band 255. Expert Verlag, Renningen.
- NHTSA (2003a):** National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), CAFE Overview, <http://www.nhtsa.gov/cars/rules/cafe/overview.htm>, abgerufen am 15.09.2003.
- NHTSA (2003b):** National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), Summary of Fuel Economy Performance, März 2003.
- Niemann, F. (2004):** Schrottautos sind gefragt wie nie. In: Der Tagesspiegel online, 23.08.2004.
- Niemeyer, G. (1977):** Kybernetische System- und Modelltheorie: System Dynamics. Verlag Vahlen, München.
- Nieschlag, R.; Dichtl, E. Hörschgen, H. (2002):** Marketing, 19. Aufl., Verlag Duncer&Humboldt. Berlin.
- Nikkei Weekly (2002):** The Nikkei Weekly. Green vehicles bring rivals together – Nissan looks to Toyota for Hybrid car systems to speed up development, 9.09.2002.
- Nikkei Weekly (2003):** The Nikkei Weekly. Big trucking firms clean up their act with natural gas, 1.04.2003.
- Nitzsch, R. v. (2002):** Entscheidungslehre – Wie Menschen entscheiden und wie sie entscheiden sollten. Schäffer-Poeschel. Stuttgart.
- Nozaki, T. (2005):** Erläuterungen zum Green Tax System in Japan, E-Mail vom 15.07.2005.
- Oba, H.; Kotani, T.; Tabata, M.; Komeda, O. (2004):** Characteristics and Analysis of Efficiency of Various Hybrid Systems, Beitrag auf dem 13. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2004, S. 935-957.
- Odrich, P. (1986):** Behördenkontakte in Japan (F.A.Z. Tokio). In: Simon, H. (Hrsg.): Markterfolg in Japan – Strategien zur Überwindung von Eintrittsbarrieren, Verlag Gabler. Wiesbaden, S. 355-362.
- Oertel, D.; Fleischer, T. (2001):** Brennstoffzellen-Technologie – Hoffnungsträger für den Klimaschutz. In: Beiträge zur Umweltgestaltung Bd. A 146. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- Ohl, S. (2000):** Prognose und Planung variantenreicher Produkte am Beispiel der Automobilindustrie. VDI-Verlag, Düsseldorf.

- Ohmae, K. (1985):** Macht der Triade, Gabler. Wiesbaden.
- Ohta, K. (2004):** Transport policy in perspective: 2004, The Japan Research Center of Transport Policy, Tokyo (Japan).
- ÖIR (2002):** Verkehrsentwicklungen und Schadstoffemissionen im Straßennetz von Wien, erstellt vom Österreichischen Institut für Raumplanung im Auftrag der Bundesarbeitskammer Wien, in: Informationen zur Umweltpolitik 141.
- Olson, S. S. (1999):** International Environmental Standards Handbook. Lewis Publishers, Boca Raton. Florida.
- ORNL (2004):** Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Future Potential of Hybrid and Diesel Powertrains in the U.S. Light-Duty Vehicle Market, US Department of Energy (DOE).
- Ossadnik, W. (2003):** Controlling. Oldenbourg Verlag. München.
- Ossimitz, G. (2003):** Entwicklung systemischen Denkens, 2. Aufl. Profil Verlag GmbH, München.
- Ostmann, B. (2004):** Nagelprobe – Konkurrenz-Gerangel zwischen Diesel und Hybrid-Antrieb, Auto Motor und Sport, 7.01.2004.
- PAJ (2006):** Petroleum Industry in Japan 2006. Petroleum Association of Japan (PAJ). Tokio. Japan.
- Peitsmeier, H. (2006):** Die Deutschen werden in Amerika wieder mutig. In: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 11.01.2006, S. 14.
- Peters, W. (2005):** Alternative Antriebe sind vor allem für die ferne Zukunft. In: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 22.11.2005, S. T1.
- Pimentel, D.; Patzek, T. W. (2005):** Producing ethanol and biodiesel from corn and other crops is not worth the energy, Cornell University, Natural Resources Research, Volume 14:1 65-76.
- Point Carbon (2004):** Several US states likely to follow California on car emissions, Carbon Market News, abgerufen am 18.06.2004.
- Point Carbon (2005):** Japan's Emissions Trouble grows, Carbon Market News, abgerufen am 27.05.2005.
- Polk Marketing Systems (2005):** Global Insight – Prognose von PKW-Neuzulassungen mit Benzin und Dieselmotoren, Volkswagen K-FTU Konzern Treasury – Umfeld- und Wettbewerbsanalyse, Mai 2005.
- PWC (2002):** Price Waterhouse Coopers Deutsche Revision (PWC): Klima im Handel – Unternehmerische Perspektiven im Klimaschutz. Frankfurt/ Main.
- Ramesohl, S.; Merten, F., Fishedick, M.; Brüggem, T. v. d. (2003):** Bedeutung von Erdgas als neuer Kraftstoff im Kontext einer nachhaltigen Energieversorgung. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Wuppertal.
- Randers, J. (1980):** Guidelines for Model Conceptualization. Elements of the System Dynamics Method. Cambridge (Mass.), In: Productivity Press, S. 117-138.
- Ratzenberger, R. (1998):** Motorisierter Individualverkehr – Ende des Anstiegs in Sicht? Demographische und ökonomische Aspekte des künftigen Verkehrswachstums. In: Schriftenreihe der Deutschen Verkehrswissenschaftlichen Gesellschaft e.V. (DVWG). Reihe B: Seminar. B 212. Kurs III/98, 19. bis 20 März 1998, Stuttgart.

- Ries, K.; Wiedemann, P. M. (2003):** Unternehmen im öffentlichen Blickfeld – Zur Funktion und Implementierung von Issue-Management-Systemen. In: Kuhn, M.; Kalt, G.; Kinter, A. (Hrsg.): Chefsache Issues Management. F.A.Z.-Institut für Management-, Markt- und Medieninformation. Frankfurt am Main, S. 15-31.
- Roemer, F. (1988):** Wachstumsschwellen in der Unternehmensentwicklung: Ein System Dynamics Modell zur Erklärung und Gestaltung von Wachstumsprozessen. Dissertation, Universität Mannheim.
- Roloff, O. (1995):** Energie und Umwelt. In: Junkernheinrich, M. u.a. (Hrsg.): Handbuch zur Umweltökonomie. Analytica-Verlagsgesellschaft, Berlin.
- Rosenkranz, G. (2005):** Deutsche Umwelthilfe (DUH). E-mail vom 13.12.2005.
- Rowe, G.; Wright, G. (2001):** Expert Opinions in Forecasting. The Role of the Delphi Technique. In: Armstrong, S. (Hrsg.): Principles of Forecasting. A Handbook for Researchers and Practitioners. Kluwer Academic Publishers (KAP), S. 125-144.
- Sauer, A. (2000):** Die Methodik der Feldarbeit für das deutsche Mobilitätspanel. In: Schriftenreihe der Deutschen Verkehrswissenschaftlichen Gesellschaft e.V. (DVWG), Reihe 8, Band B 234, S. 35-45.
- Schäfer, H. J. (2004):** Hybrid-Challenge 2004. In Leading points – der Management-Letter des Volkswagen Konzerns, Nr. 4, S. 4.
- Schäfer, H.J. (2005a):** Gespräch am 24.11.2005 zu NO_x-Grenzwerten in den USA und Europa.
- Schäfer, H.J. (2005b):** Instrumente zum Klimaschutzbeitrag des Verkehrs, Arbeitskreis Klimastrategien, Wolfsburg, 30.06.2005.
- Schindler, K.-P. (2002):** Emission Trading Implemented in Japan to Cut GHG Emissions. E-mail vom 1. August 2002.
- Schindler, V. (1997):** Kraftstoffe für morgen – Eine Analyse von Zusammenhängen und Handlungsoptionen, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Schmidt, G. (1994):** Methode und Techniken der Organisation, Schriftenreihe „Der Organisator“ (Bd. 1). Verlag Dr. Götz Schmidt, Gießen.
- Schmidt, Georg (2003):** Interview vom 24.04.2003 zu Umwelt- und Verkehrsgesetzgebung in Japan. Deutsche Botschaft, Tokio.
- Schmidt, M. (1994):** Integrierte Verkehrsplanungsansätze im Rahmen von kommunalen Emissionsminderungs- und Klimaschutzkonzepten. In: VDI-Berichte, Nr. 1138. VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik. Verkehrskonzepte für Ballungsräume, Tagung Duisburg, 16./ 17. Juni 1994. VDI-Verlag.
- Schmidt, M. (2003):** Modellierungsfragen – Umberto Workshop am 17./18.09.2003 in Hamburg. Hochschule Pforzheim.
- Schmidt, W.-P.; Dahlqvist, E.; Finkbeiner, M.; Krinke, S.; Lazzari, S.; Oschmann, D.; Pichon, S.; Thiel, C. (2004):** Life Cycle Assessment of Lightweight and End-of-Life Scenarios for Generic Compact Class Passenger Vehicles. Int.J LCA 9 (6) 2004 (OnlineFirst): 1-12. ecomed publishers, Landsberg Germany.
- Schmitt, D; Düngen, H. (1996):** Energie und Umwelt. In: Junkernheinrich, M. u.a. (Hrsg.): Handbuch zur Umweltökonomie. Analytica-Verlagsgesellschaft, Berlin.

- Schneeweiß, C. (1990):** Zur Definition und gegenseitigen Abgrenzung der Begriffe Flexibilität, Elastizität und Robustheit. In: Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung (Zfbf), Bd. 42, Nr. 5, S. 378-395.
- Schneeweiß, C. (1991):** Planung 1: Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen. Springer-Verlag, Berlin [u.a.].
- Schneeweiß, C. (1992):** Planung 2: Konzepte der Prozeß- und Modellgestaltung. Springer-Verlag, Berlin [u.a.].
- Scholl, A. (2001):** Robuste Planung und Optimierung: Grundlagen – Konzepte und Methoden – experimentelle Untersuchung. Physica-Verlag, Heidelberg.
- Schröter, M. (2006):** Strategisches Ersatzteilmanagement in Closed-Loop Supply Chains – Ein systemdynamischer Ansatz. Deutscher Universitäts-Verlag. Wiesbaden.
- Schulte-Zurhausen, M. (1995):** Organisation, 4. Aufl.. Verlag Vahlen, München.
- Schumann, J. (1987):** Grundzüge der mikroökonomischen Theorie, 5. Aufl., Wiesbaden.
- Schütte, H. (1999):** Asian culture and the global consumer. In: Mastering Marketing. Financial Times Prentice Hall, London.
- Schwacke (2003):** Eurotax Schwacke GmbH: EurotaxSCHWACKE Automotive Business Intelligence: Partikelfilter und Gebrauchtwagenrestwerte. Eine Kurzexpertise für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Maintal: Internet: 2003.http://www.bmu.de/files/expertise_031026.pdf, abgerufen am 30.01.2005.
- Schwacke (2004a):** Eurotax Schwacke GmbH: Wert(vor)(ur)teile. Alfa Romeo 156 Sportwagon. In: Schwacke Dialog. Ausgabe 02/2004 Maintal: Internet, 2004. S. 8-10. www.schwacke.de, abgerufen am 30.01.2005.
- Schwacke (2004b):** Eurotax Schwacke GmbH: Markttrends. Wissen ist Macht. In: Schwacke Dialog. Ausgabe 02/2004 Maintal: Internet, 2004. S. 13-14. www.schwacke.de, abgerufen am 30.01.2005.
- Schwaninger, M. (1996):** Systemtheorie. In: Kern, W. u.a. (Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft, 2. Aufl.. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, Sp. 1946-1959.
- Schwaninger, M.; Hechenblaickner, P. (2002):** Planung aus Sicht der neuen Kybernetik. In: Milling, P. (Hrsg.): Entscheiden in komplexen Systemen. Verlag Duncker&Humblot. Berlin, S. 69-87.
- Schwarze, J. (1980):** Angewandte Prognoseverfahren. Verlag Neue Wirtschafts-Briefe, Herne.
- Seidel, M. (2004):** Westdeutscher Rundfunk (WDR): Förderung von Erdgasautos. Internet, 2004. http://www.wdr.de/tv/service/verkehr/inhalt/20040120/b_2.phtml, abgerufen am 13.01.2005.
- Senge, P. M. (1996):** Die fünfte Disziplin: Kunst und Praxis der lernenden Organisation. Klett-Cotta, Stuttgart.
- Shell (2004):** Shell PKW-Szenarien bis 2030. Flexibilität bestimmt Motorisierung. Szenarien des PKW-Bestandes und der Neuzulassungen in Deutschland bis zum Jahr 2030. Shell Deutschland Oil, Hamburg.
- Shell (2005):** Shell Deutschland Oil: Shell V-Power. Shell Deutschland Oil, Hamburg. Internet. <http://www.shell-tankstelle.de>, abgerufen am 27.01.2005.

- Sherman, D. (2004):** Gas Models take cues from diesels, New York Times.com, 23.08.2004
- Sherwood, D. (2003):** Den Wald vor lauter Bäumen sehen – Reduktion von Komplexitäts-Anleitung zum Systemischen Denken im Management, 1. Aufl. Wiley-VCH, Weinheim.
- Shirouzu, N.; Sapsford, J. (2005):** Rivals GM, Toyota discuss sharing hybrid technology. In: Wall Street Journal Europe, 9.05.2005.
- Simon, H. A. (1976):** Administrative behaviour: A study of decision-making processes in administrative organizations, 3. Aufl., Free Press [u.a.], New York [u.a.].
- Simonis, U. E. (1996):** Globale Umweltpolitik. In: Junkernheinrich, M. u.a. (Hrsg.): Handbuch zur Umweltökonomie. Analytica-Verlagsgesellschaft, Berlin.
- Simonis, U. E. (1985):** Ökologische Orientierung der Ökonomie, in: Jänicke, M. et al. (Hrsg.), Wissen für die Umwelt, S. 218f.
- Smith, G. (2005):** Wir werden die Zahl der Hybriden erhöhen. Interview in der Börsenzeitung, 12.01.2005.
- Spallek, M. F. (2005):** Aktueller Stand der Wirkungsforschung zu Partikeln und Automobilabgasen, Technischer Kongreß 2005 des VDA, Session 1: Umwelt und Energie.
- Spengler, T. (1998):** Industrielles Stoffstrommanagement – Betriebswirtschaftliche Planung und Steuerung von Stoff- und Energieströmen in Produktionsunternehmen. Verlag Erich Schmidt. Berlin.
- Sperling, T. (2004):** Energieverbrauchskennzeichnung ist jetzt gesetzlich vorgeschrieben. In: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 6.11.2004.
- Spiegel (2006):** Bund will Wasserstoffautos mit 500 Millionen Euro fördern, in: Spiegel Online. <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,405976,00.html>, abgerufen am 14.03.2006.
- SRU (2005):** Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU). Sondergutachten Umwelt und Strassenverkehr 2005, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Köln: Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft mbH, 2005. (SG_Umwelt_und_Strassenverkehr2005_web_g[1].pdf)
- Steffenhagen, H. (1991):** Marketing – Eine Einführung, 2. Aufl..Kohlhammer, Stuttgart, Berlin.
- Steger, U. (1996):** Umwelt-Auditing. In: Junkernheinrich, M. u.a. (Hrsg.): Handbuch zur Umweltökonomie. Analytica-Verlagsgesellschaft, Berlin.
- Steiger, W.; Warnecke, W., Louis, J. (2003):** Potentiale des Zusammenwirkens von modernen Kraftstoffen und zukünftigen Antriebskonzepten, In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) 105, Vol. 3. Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft. Wiesbaden.
- Stepan, A.; Fischer, E. O. (2001):** Betriebswirtschaftliche Optimierung: Einführung in die quantitative Betriebswirtschaftslehre, 7. Aufl.. Oldenbourg-Verlag, München [u.a.].
- Stephan, G.; Ahlheim, M. (1996):** Ökonomische Ökologie. Springer-Verlag. Berlin.
- Sterman, J. D. (1991):** A skeptic's guide to computer models. In: Barney, G. O. u.a. (Hrsg.): Managing a Nation: The Microcomputer Software Catalogue. Westview Press. Boulder [u.a.], S. 209-229.
- Sterman, J. D. (2000):** Business Dynamics – Systems thinking and modeling for a complex world. The Graw-Hill Companies, Inc. Kingsport.

- Sterman, J., D. (2002):** All models are wrong: reflections on becoming a systems scientist. In: O.V.: System Dynamics Review Vol. 18, No. 4, (Winter 2002). Internet: J. Wiley & Sons Ltd., S. 501 - 531. <http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/jtoc/11215/2003>, abgerufen am 22.02.2006.
- Stern (2003):** Stern Gruner + Jahr AG: Stern Markenprofile 10. Basispräsentationen PKW-Branche (09/2003). Gruner + Jahr AG & Co. KG, Hamburg.
- Ströbele, W. (1996):** Ökonomie natürlicher Ressourcen, In: Junkernheinrich, M. u.a. (Hrsg.): Handbuch zur Umweltökonomie. Analytica-Verlagsgesellschaft, Berlin.
- Sturbeck, W. (2005):** Die Autogas-Branche ringt mit Trittin um Gleichbehandlung. In: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 5.04.2005, S. 13.
- Takeuchi, H. (1986):** Die globalstrategische Rolle des japanischen Marktes. In: Simon, H. (Hrsg.): Markterfolg in Japan. Gabler, Wiesbaden, S. 15-35.
- Takeuchi, T. (2004):** Kankyō kōzō kaikaku – Doitsu no keiken kara 環境構造改革・ドイツの経験から Umweltstrukturreform – die deutschen Erfahrungen. Risaikuru Bunkasha, Tokio.
- Tanaka, H. (2003):** Demand-side measures in the Transportation sector.
- Tartler, J. (2004):** ADAC fordert CO₂-Steuer für Autos, Financial Times Deutschland, 15.12.2004, Hamburg.
- TE (2005):** European Federation for Transport and Environment: Efforts to Reduce CO₂-Emissions from Passenger Cars, Clean Cars 2010 – a discussion on European environmental policy for the passenger car. Brüssel, 20.01.2005
- Thiele, E.; Merker, G. P. (2004):** Neue emissionssparende Fahrzeugkonzepte:. In: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU): Automobil und Umweltschutz. Technik und Fahrverhalten – an welchen Rädern dreht der Fahrer? Fachtagung am 29.01.2004. Augsburg, S. 56-66.
- Thurstone, L. L. (1927):** A law of comparative judgment. In: Psychological Review, Bd. 34, S. 273-286.
- Thurstone, L. L. (1945):** The Prediction of Choice. In: Psychometrika, Vol. 10, No. 4, S. 237-253.
- Tierney, C. (2005a):** Hybrid vehicle demand soars. In: Detroit News Online, 30.05.2005.
- Tierney, C. (2005b):** With high gas prices, drivers give diesel cars a second look. In: Detroit News, 25.05.2004.
- Tischler, K. (1994):** Umweltökonomie. Oldenbourg-Verlag, München
- TMG (2003):** Tokyo Metropolitan Government (2003). In: Introducing Diesel Vehicle Control.
- Tokyo Metropolitan Government (2002a):** The Environment in Tokyo, Tokyo Metropolitan Government, Bureau of Environment, Tokyo.
- Tokyo Metropolitan Government (2002b):** Summary of Regulations and the like on Automobiles. Tokyo Metropolitan Government, Bureau of Environment, Tokyo.
- Toyota (2005):** Toyota Deutschland GmbH: Prius – Die Zukunft beginnt heute. Angaben zu Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionswerten. Köln: Internet 2004: <http://www.toyota.de/showroom/prius2003/index.html>, abgerufen am 11.01.2005.

Train, K. E. (2003): Discrete Choice Methods with Simulation. Cambridge University Press, Cambridge.

Trechow, P. (2005): VW will Hybrid ab 2007 in die USA liefern. In: VDI-Nachrichten vom 24.06.2005.

Treece, J.B.; Webb, A. (2003): Amazing Pace – China's auto industry roars to life with world-beating growth rates. In: Automotive News, 20.10.2003, p. 40.

TREMOVE (2004): Fuel Consumption and Emission Module, <http://www.tremove.org/newmodel/enhancement/emissionsmodule.htm>, abgerufen am 21.04.2004.

Triplett, J. E. (1973): Consumer demand: A new approach (Book Review). In: Journal of Economic Literature. American Economic Association, Nashville. Tennessee, S. 77-81.

Troja, M. (1998): Umweltpolitik und moderne Ökonomik: Der Beitrag der Neuen Politischen Ökonomie und der Neuen Institutionenökonomik zur Erklärung umweltpolitischer Entscheidungsprozesse. In: Schriften zur internationalen Umweltpolitik, Bd. 9. Münster.

Tsuru, S. (1999): The Political Economy of the Environment. The case of Japan. UBC Press, Vancouver.

Turban, E.; Aronson, J. E. (2001): Decision support systems and intelligent systems, 6. Aufl.. Prentice Hall, Upper Saddle River (NJ).

Tutz, G. (2000): Die Analyse kategorialer Daten – Anwendungsorientierte Einführung in Logit-Modellierung und kategoriale Regression. Oldenbourg-Verlag, München.

Tversky, A. (1972): Elimination by aspects – A theory of choice. In: Psychological Review Bd. 79, S. 281-299.

UBA (2001): Umweltbundesamt: Daten zur Umwelt: Der Zustand der Umwelt in Deutschland 2000. Verlag Erich Schmidt, Berlin.

UBA (2003a): Umweltbundesamt: Daten zur Umwelt. Der Zustand der Umwelt in Deutschland 2003: Treibhausgase und globale Auswirkungen. Berlin: Internet, 2003. <http://www.env-it.de/umweltdaten/jsp/index>, abgerufen am 03.12.2004.

UBA (2003b): Umweltbundesamt: Daten zur Umwelt. Der Zustand der Umwelt in Deutschland 2003: Abbau des Stratosphärischen Ozons. Berlin: Internet, 2003. <http://www.env-it.de/umweltdaten/jsp/index>, abgerufen am 03.12.2004.

UBA (2003c): Umweltbundesamt: Daten zur Umwelt. Der Zustand der Umwelt in Deutschland 2003: Luft. Berlin: Internet, 2003. <http://www.env-it.de/umweltdaten/jsp/index>, abgerufen am 03.12.2004.

UBA (2003d): Umweltbundesamt: Daten zur Umwelt. Der Zustand der Umwelt in Deutschland 2003: Belastung des Menschen mit Schadstoffen. Berlin: Internet, 2003. <http://www.env-it.de/umweltdaten/jsp/index>, abgerufen am 03.12.2004.

UBA (2003e): Umweltbundesamt: Dieselfahrzeuge. Berlin: Internet, 2003. <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/dieselfahrzeuge.htm>, abgerufen am 2.02.2005.

UBA (2003f): Future Diesel – Abgasgesetzgebung PKW, leichte Nutzfahrzeug und LKW - Fortschreibung der Grenzwerte bei Dieselfahrzeugen. Berlin: UBA.

UBA (2003g): Umweltbundesamt: Daten zur Umwelt. Der Zustand der Umwelt in Deutschland 2003: Umwelt und Energie. Berlin: Internet, 2003. <http://www.env-it.de/umweltdaten/jsp/index>, abgerufen am 03.12.2004.

UBA (2003h): Umweltbundesamt: CO₂-Minderung im Verkehr – Ein Sachstandsbericht des Umweltbundesamtes. 10.09.2003. Berlin.

UBA (2004): Umweltdaten Deutschland: Kraftstoffverbrauch. Internet: <http://www.env-it.de/umweltdaten>, abgerufen am 2.12.2004.

UBA (2005a): Hintergrundpapier zum Thema Staub/ Feinstaub (PM), Berlin März 2005.

UBA (2005b): Umweltbundesamt: Schluss mit Ruß. Internet: <http://www.umweltbundesamt.at/umweltschutz/verkehr/fahrzeugtechnik/abgasnachbehandlung/filter/>, abgerufen 11.12.2005.

UBA (2006): Umweltbewusstsein 2006. Zusammenfassung wichtiger Ergebnisse. Internet. <http://www.umweltbewusstsein.de>, abgerufen am 12.02.2007.

Ullrich, M. (2005): Energiespeichersysteme für Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeuge, Volkswagen AG, Beitrag auf der DGES Fachtagung, Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeuge: Energiemanagement-Aufgaben und Strukturen, Ingolstadt 09.-10.06.2005.

Uranishi, T. (2005): 2010 sind wir Weltmarktführer, Interview mit Toyota-Manager Tokuichi Uranishi. In: Süddeutsche Zeitung, 21.03.2005.

Varian, H. R. (2001): Grundzüge der Mikroökonomik, 5. Aufl.. Oldenbourg-Verlag, München.

VCD (2004): Vorbild Kühlschrank – CO₂-Kennzeichnungspflicht für Autos. In: Verkehrsclub Deutschland (VCD) Fairkehr, Nr. 1. Bonn.

VDA (2003): Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA): Auto Jahresbericht 2003. Heinrich Druck + Medien, Frankfurt am Main.

VDA (2005): Emissionshandel im Verkehr, Volkswagen AG, Wolfsburg. 3.06.2005.

VDA (2005b): Auto Jahresbericht 2005. Frankfurt am Main. www.vda.de, abgerufen am 20.08.2005.

VDI (2003): VDI-Berichte 1808: Kraftstoffe und Antriebe der Zukunft – Synergien für eine nachhaltige Zukunft? VDI Verlag GmbH, Düsseldorf.

VDIK (2005): Kfz-Erneuerungsprogramm des VDIK. Bad Homburg, 1.10.2005, www.pro-saubere-luft.de, abgerufen am 10.03.2006.

Vennix, J. A. M. (2001): Group model building: facilitating team learning using systems dynamics. Wiley, Chichester.

Vensim (2003): Vensim User's Guide Version 5. Ventana Systems Inc. Internet: <http://www.vensim.com/documentation.html>, abgerufen am 1.06.2005.

Volk, F. (2005): Geld-Fieber – Wolken über dem Hoffungsmarkt China. In Auto, Motor und Sport, 19.01.2005.

Volkswagen (2004a): Der Golf. Preisliste gültig für das Modelljahr 2005. Wolfsburg, Internet.

Volkswagen (2004b): Der Polo. Preisliste für das Modelljahr 2005. Wolfsburg, Internet.

Volkswagen (2007a): Investorenkonferenz am 9.03.2007. Pressetermin. Wolfsburg.

Volkswagen (2007b): Der Passat Umweltprädikat. Konzernforschung Umweltprodukt. Stand Juni 2007. Wolfsburg.

Voß, S.; Gutenschwager, K. (2001): Informationsmanagement, Springer-Verlag, Berlin [u.a.].

VTT (2000a): Diesel in Japan – Situationsbericht September 2000. Volkswagen Technical Representative Tokyo (VTT). Technology Report, No. T1-00-01, 18.09.2000.

VTT (2000b): Deselemissionen und Gesundheitsgefährdung. Volkswagen Technical Representative Tokyo (VTT) an Herrn Dr. Schindler, Volkswagen AG (EA), 17.08.2000.

VTT (2001a): Japan-Information zu ‚DaimlerChrysler Diesel Seminar‘, Interne Mitteilung am 6.11.2001.

VTT (2001b): Tendenzen von Eco-Cars in Japan. Volkswagen Technical Representative Tokyo (VTT) an Herrn Kögler (EZ), Kopp (K-SL), Jacoby (K-VA), Heinrich (K-E), Volkswagen AG, 22.06.2001.

VTT (2001c): No Brand Fuel and Fuel Quality in Japan. Volkswagen Technical Representative Tokyo (VTT). Vehicle Technology Report. 15.03.2001.

VTT (2003a): Diesel Passenger Vehicle Trend in Japan, 30.10.2003.

VTT (2003b): Environment Management Survey 2002, 11.03.2003.

VTT (2003c): Green Tax System in Japan. Datei VTT Japan (2003)

VTT (2004a): Bosch „Diesel Day in Japan 2004“, 8.06.2004.

VTT (2004b): Reaction for Bosch „Diesel Day in Japan 2004“, 2.07.2004.

VTT (2005): Current situation of Bio-Ethanol blended gasoline in Japan, No. T1-05-02, 9.02.2005.

VTT (2006): Environment tax back on table, opponents prepare to dig in. In: The Nihon Keizai Shimbun, Tokyo

VTT MTN (2002a): VTT Monthly Technology News, Dezember 2002.

VTT MTN (2002b): VTT Monthly Technology News, November 2002.

VTT MTN (2002c): VTT Monthly Technology News, September 2002.

VTT MTN (2002d): VTT Monthly Technology News, Juli 2002.

VTT MTN (2002e): VTT Monthly Technology News, Februar 2002.

VTT MTN (2003a): VTT Monthly Technology News, August 2003.

VTT MTN (2003b): VTT Monthly Technology News, Juli 2003.

VTT MTN (2003c): VTT Monthly Technology News, Juni 2003.

VTT MTN (2003d): VTT Monthly Technology News, Mai 2003.

VTT MTN (2003e): VTT Monthly Technology News, März 2003.

VTT MTN (2003f): VTT Monthly Technology News, Februar 2003.

VTT MTN (2004): VTT Monthly Technology News, Juni 2004.

VTI MTN (2004b): VTI Monthly Technology News, Mai 2004.

VTI MTN (2004c): VTI Monthly Technology News, April 2004.

VWoA (2005): Erläuterungen zum CAFE-System. Volkswagen of America (VWoA), E-Mail vom 15.11.2005.

Wada, M. (2004): The Tendency to review the basic concept for the prevention of warming, report of session held on July 29th 2004 of the Global Warming Subcommittee of the Central Environmental Council by Japanese Automobile Importers Association (JAIA).

Wagner, F. (2005): Autobauer vertrauen dem Hybridantrieb. In Handelsblatt, 31.03.2005.

Wandtner, R (2005): Wenn Autos mit Stroh und Ästen fahren – Hochprozentiges im Benzin, In: Frankfurter Allgemeine Zeitung vom 12.10.2005, S. N1.

Weber, T. (2004): DaimlerChrysler sees big opportunity for new diesel cars in U.S., Detroit News, 20.01.2004.

Weidner, H. (1996a): Basiselemente einer erfolgreichen Umweltpolitik – eine Analyse und Evaluation der Instrumente der japanischen Umweltpolitik. Wissenschaftszentrum für Sozialforschung. Edition Sigma. Rainer Bohn Verlag, Berlin.

Weidner, H. (1996b): Entwicklungslinien und Merkmale der Umweltpolitik, in: Pohl, M.; Mayer, H. J. (Hrsg.): Länderbericht Japan. Bundeszentrale für politische Bildung, Schriftenreihe Band 355, Bonn.

Weizsäcker, E. U. v.; Jesinghaus (1992): Teil 1. Europäische Ebene. In: Mauch, S. P. u.a. (Hrsg.): Ökologische Steuerreform – Europäische Ebene und Fallbeispiel Schweiz. Ruediger-Verlag, Zürich, S. 15-83.

Welch, D.; Kerwin, K. (2004): California rules, Detroit quakes, Business Week, 28.06.2004.

Wells, P. (2005a): Are there really three steps to (hydrogen) heaven? In: Automotive World (AW) Knowledge, 10.01.2005.

Wells, P. (2005b): Cars 21 and the future of the European Automotive Industry, Automotive World (AW), 27.06.2005.

Wentzel, D. (2005): Selbstregulierung – ein institutionenökonomisches Konzept und seine empirische Umsetzung. In: Duisburger Arbeitspapiere Ostasienwissenschaften No. 49/ 2003, Werner Pascha, Storz, C. (Hrsg.), Workshop Organisation und Ordnung der japanischen Wirtschaft III, Themenschwerpunkt: Institutionenökonomik und Japanstudien.

White, J. B. (2004): VW, Daimler try to sell Americans on Cheap Diesel, Wall Street Journal Europe, 27.05.2004.

Wichmann, H.-E. (2003): Abschätzung positiver gesundheitlicher Auswirkungen durch den Einsatz von Partikelfiltern bei Dieselfahrzeugen in Deutschland, im Auftrage des Umweltbundesamtes Berlin, 7.06.2003.

Wicke, L. (1991): Umweltökonomie – Eine praxisorientierte Einführung. Verlag Vahlen., München.

Wirsig, G. (2005): Größe zählt doch. In: Automobilindustrie 11/2005.

Wokaun, A.; Lienin, S. F.; Gassmann, F.; Janssen, A. (2005): Reduktion der CO₂-Emissionen – Fokus auf Fahrzeuge mit hoher Laufleistung, ATZ 2/2005 Jahrgang 107, S. 134 – 138.

- Wonacott, P. (2004):** China's Fuel-Economy Rules Challenge Car Makers, The Asian Wall Street Journal, 9.11.2004.
- Wüst, C. (2004):** Hochdruck im Tank. In: Der Spiegel vom 7.06.2004, ein Gespräch mit Daniel Kammerer, BMW-Sprecher für Umweltthemen.
- Yamaki, T. (1986):** Werbung in Japan. In: Simon, H. (1986): Markterfolg in Japan – Strategien zur Überwindung von Eintrittsbarrieren, S. 243-255.
- Yano (2005a):** Japanese User Survey Perception for Diesel Passenger Vehicles. Yano research Institute Ltd. 20.10.2005, Datei: UserSurvey_YRI_Oct202005.pdf
- Yano (2005b):** Survey on the Users of Hybrid Automobiles. Yano Research Institute. Datei: YanoResearchInstituteSurveyHybrid.pdf
- Zäpfel, G. (2000):** Strategische Produktionsmanagement. Oldenbourg-Verlag. München.
- Zahn, E. (1973):** Zur Anwendung mathematischer Modelle bei der strategischen Planung. In: Grochla, E.; Szyperski, N. (Hrsg.): Modell- und computergestützte Unternehmensplanung. Verlag Gabler., Wiesbaden, S. 567-619.
- Zahn, E. (1991):** Strategieunterstützungssysteme. In: Milling, P. (Hrsg.): Systemmanagement und Managementsysteme [Festgabe für Gert v. Kortzfleisch zum 70. Geburtstag]. Verlag Duncker&Humblot. Berlin, S. 43-79.
- Zanger, C.; Gaus, H. (2003a):** Markenführung: Das Umweltschutzzeichen als Marke – Relaunch des Blauen Engels. In: Absatzwirtschaft, Ausgabe 3/2003, S. 1-7.
- Zanger, C.; Gaus, H. (2003b):** Marketing für Umweltzeichen – Konzeptionelle Grundlegung und Implikation für Umweltstrategien (Working Paper). 6. Nordic Conference of Environmental Social Sciences (NESS), Juni 2003, Turku/Åbo, Finnland (Working Group 2: "Limits to Growth Today") unter dem Titel 'Marketing Approaches to the Promotion of Eco-labelling Schemes: Conceptual Foundation and Implications for Communication Strategies'.
- Zhang, S. (2005):** Emission control and fuel consumption limits in China, Corporate Government Relations Steering Committee Meeting, Wolfsburg, 3.06.2005.
- Zintz, K. (2005):** Nach dem Dieselruß sind nun die Stickoxide im Visier, Stuttgarter Symposium für Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren. In: Stuttgarter Zeitung, 23.02.2005.
- Zumkeller, D.; Chlond, B.; Manz, W. (2001):** Panelauswertung 1999/ 2000. Auswertung Mobilitätspanel und Tankbuchdaten. Karlsruhe.